Die Fernsprechstörwirkung von Gleichrichterbahnen

Von der
Technischen Hochschule zu Breslau
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs
genehmigte

Dissertation

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. Ludwig Roehmann
aus Breslau

Berichter:
Prof. Dr.-Ing. Gg. Hilpert

Mitberichter:
Oberpostdirektor Prof. Dr. K. Lange

Tag der mündlichen Prüfung: 15. Juni 1928

Universitätsverlag von Robert Noske in Borna-Leipzig
1928

Drittes Kapitel (in erweiterter Fassung) erschienen in der Telegraphen- und Fernsprechtechnik Bd. 18, 1929, Heft 1.

Viertes Kapitel (in der ursprünglichen Fassung) erschienen in den Elektrischen Bahnen Jahrgang 1928, Ergänzungsheft: „Fernmeldebetrieb an elektrischen Bahnen mit Gleichrichter-Speisung und in Fernmeldekabeln an Wechselstrombahnen“ S. 38.

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Inhalt.

Seite

Einleitung 1

I. Kapitel: Die Welligkeit und die Mittel zu ihrer Verminderung . . 2
A. Die Welligkeit 2
B. Die Maßnahmen zur Verminderung der Welligkeit . 5

II. Kapitel: Die Kopplung zwischen Starkstrom- und Schwachstromsystem 11
A. Grundlagen 11
B. Für die vorliegende Aufgabe wichtige Einzelfeststellungen 12

III. Kapitel: Die Unsymmetrie 19
A. Gleichgewicht 20
B. Querunsymmetrie 27

IV. Kapitel: Messung der Fernsprechstörwirkung von Gleichrichterbahnen 33
A. Die Untersuchung des Stroms J_0 33
B. Die Untersuchung der Spannung $\mathfrak{E}_0$ 44

Literatur 51

Anlage 1: Untersuchung des Frequenzeinflusses auf den Betrag des Scheinwiderstands von Resonanz-Querkreisen 55

Anlage 2: Ableitung der Formel: $Gspg_l = u_{e/4} \cdot \omega \cdot m_E \cdot l \cdot \mathfrak{F}$ 56

Anlage 3: Anordnung zur Gleichgewichtsmessung stark unsymmetrischer Schaltungen 58

Anlage 4: Rechnerische Untersuchung des Einflusses geerdeter Induktionsschutzdrähte 59

Anlage 5: Ergebnisse von Messungen im Gleichrichterwerk Tegel der Deutschen Reichsbahn-Gesellschaft 62

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41548228_0023

Einleitung.

Vorbemerkung zur Bezeichnungsweise.

Bei den Ausdrücken für die Spannungen und Ströme bedeuten die lateinischen Zeichen (E, I) Gleichstromwerte, die deutschen Zeichen (𝔈, 𝔍) Beträge (nicht Vektoren) der Wechselstromwerte (vgl. S. 2).

Der Bau von Quecksilberdampf-Gleichrichtern hat in den letzten Jahren große Fortschritte gemacht. Steigerung der Betriebssicherheit geht Hand in Hand mit weitgehender Automatisierung; immer größere Stromeinheiten, immer höhere Spannungen lernt man konstruktiv zu beherrschen. Die mancherlei Vorzüge, die die Gleichrichter namentlich im Bahnbetrieb gegenüber umlaufenden Maschinen aufweisen, haben eine sehr starke Steigerung der nach dem Kriege zum Einbau gelangten Gleichrichter-kW zur Folge gehabt, wie die Aufstellungen der Gleichrichter bauenden Firmen beweisen. Die Entwicklung wird unterstützt durch das Bestreben, aus wirtschaftlichen Gründen kleinere, zur Speisung örtlicher Bahnen dienende Gleichstromzentralen stillzulegen und die Energie als hochgespannten Drehstrom aus Großkraftwerken zu beziehen.

Die Schwachstromtechniker beobachten diese Entwicklung mit Besorgnis. Jeder neu zur Aufstellung gelangende Gleichrichter kann, wenn die örtlichen Vorbedingungen gegeben sind, Induktionsstörungen des Fernsprechverkehrs verursachen. In Deutschland wird gegenwärtig an einer größeren Zahl von Stellen der Fernsprechverkehr durch Gleichrichtergeräusche beeinträchtigt, zum Teil unmöglich gemacht.

Eine Klärung aller technischen Fragen, die Gleichrichterbahnen und Fernsprechanlagen „im Hinblick auf gegenseitige Näherungen“ betreffen, erscheint deshalb durchaus erforderlich. Hierzu einen Beitrag zu liefern, ist die Absicht dieser Arbeit.

Wenn in Fernsprechanlagen induktive Störungen durch Gleichrichter-Beeinflussung auftreten, so müssen grundsätzlich drei Voraussetzungen erfüllt sein:

erstens: die Stromkurve des Gleichstroms muß eine gewisse Welligkeit haben;

zweitens: Starkstrom- und Fernsprechanlage müssen irgendwie elektromagnetisch gekoppelt sein;

drittens: die Fernsprechanlage muß eine Unsymmetrie besitzen.

Erstes Kapitel.

Die Welligkeit und die Mittel zu ihrer Verminderung.

A. Die Welligkeit.

Die von Gleichrichterbahnen verursachten Störungen von Fernsprechanlagen sind induktiver Natur; sie werden von dem mehrwelligen Strom $\mathfrak{J}_0$ hervorgerufen, der dem Betriebsgleichstrom I_0 überlagert ist. Es werden also in den folgenden Untersuchungen nur diejenigen Störungen behandelt werden, die im stationären Zustand der Starkstromanlage auftreten; die durch Schaltvorgänge, also durch $\frac{d I_0}{d t}$ verursachten Induktionswirkungen bleiben außer Betracht. Sie sind nicht für Gleichrichterbahnen charakteristisch, sondern können an sich durch jede Gleichstromanlage hervorgerufen werden. Ihrer Kurzzeitigkeit wegen werden sie in Kauf genommen, vorausgesetzt, daß die in den Fernsprechanlagen induzierten Spannungen nicht zu Gefährdungen führen (Knallgeräusche, Berührungsspannungen)[1]).

Statt einer Untersuchung des Stroms $\mathfrak{J}_0$ werde zunächst diejenige der Wechselspannung $\mathfrak{E}_0$ unternommen, die der Gleichspannung (Nennspannung) E_0 überlagert ist. Die Untersuchung hat sich grundsätzlich auf Betrag, Frequenz und Phase der diese Spannung bildenden Harmonischen zu erstrecken.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Fernsprechstörwirkung eines bestimmten Typs von Starkstromanlagen. Aus diesem Grund kommt bei der Untersuchung der Spannungen oder Ströme, die die Fernsprechstörungen verursachen, eine Betrachtung der Phasenlagen nicht in Frage. Denn die Fernsprechstörwirkung läuft letzten Endes auf akustische Probleme hinaus, und das Ohr reagiert auf Frequenz und Betrag, aber nicht auf Phase.

---

[1]) Vgl. das Literaturverzeichnis am Ende der Arbeit.

Bei dem idealen, p-anodigen Gleichrichter, der an sinusförmiger Spannung der Netzfrequenz f liegt und keine Zündverzerrungen besitzt, sind die Frequenzen der Harmonischen $n \cdot p \cdot f$ ($n = 1, 2, 3 \ldots$), also bei dem praktisch häufigsten Fall von $p = 6$ Anoden und $f = 50$ Hz: 300, 600, 900 ... Hz. Diese Frequenzen liegen mitten im Sprachgebiet; es ist also erklärlich, daß sie zur Erzeugung starker Fernsprechstörungen geeignet sind. — Die Effektivwerte der Harmonischen in Prozent der Gleichspannung gehen bei $p = 3$, 6 und 12 ($f = 50$) aus der Tabelle 1 hervor[2]). — Für die Harmonischen des Stroms eines idealen Gleich-

Tabelle 1.

Effektivwerte der Spannungsharmonischen des idealen, p-phasigen Gleichrichters bei $f = 50$ Hz in % der Gleichspannung.

Netzfrequenz $f = 50$ Hz			
Frequenzen der Oberschwingungen in Hz	Anodenzahl $p =$		
	3	6	12
150	17,7	—	—
300	4,0	4,0	—
450	1,8	—	—
600	1,0	1,0	1,0
750	0,6	—	—
900	0,4	0,4	—
1050	0,32	—	—
1200	0,25	0,25	0,25
1350	0,19	—	—
1500	0,16	0,16	—
1650	0,13	—	—
1800	0,11	0,11	0,11

richters läßt sich eine ähnliche Tabelle nicht aufstellen. Zunächst ist der Gleichstrom nicht, wie die Spannung, konstant, sondern kann zwischen Leerlauf und Überlast jeden beliebigen Wert annehmen. Er wird durch die — variable — Belastung des Netzes bestimmt; weniger durch dessen ohmschen Widerstand (Heizung und Beleuchtung bei stillstehenden Fahrzeugen!) als durch die Gegenspannung der Motoren. Weiterhin ist auch der Scheinwiderstand des Netzes für die Oberwellen nicht eindeutig festgelegt. Bei Oberleitungen und kürzeren Längen der gespeisten Abschnitte, Voraussetzungen, die für Straßen- und Kleinbahnen

in der Regel erfüllt sind, wird man auch für die Grundharmonische des Oberwellenstroms den ohmschen und kapazitiven Widerstand des Netzes gegen den induktiven vernachlässigen können, so daß dann also die Beträge der Ströme bezüglich denen der zugeordneten Spannungen mit dem Faktor $\frac{1}{\omega}$ erscheinen. — Anders liegen die Verhältnisse bei Speisung über dritte Schiene. Deren Kapazität gegen Erde beträgt auf Grund von Rechnungen und Messungen etwa das 20-fache derjenigen einer Freileitung, rd. 0,1 μF/km. Aus diesem Grund kann bei dritter Schiene nicht mehr mit den Formeln des quasistationären Zustands gerechnet werden, sondern es sind die Formeln der Leitungstheorie in Anwendung zu bringen. Macht man die folgenden, in erster Annäherung zulässigen Annahmen: $L = 1$ mH/km, $C = 0{,}1\ \mu$F/km, $R = 0$, $G = 0$, so erhält man für den Wellenwiderstand $\mathfrak{Z} = \sqrt{\frac{L}{C}} = 100$ Ohm und für die Fortpflanzungskonstante $\gamma = j \cdot \omega \cdot \sqrt{L \cdot C} = j\,\omega \cdot 10^{-5}$. Aus den Gleichungen für den Leerlauf- und Kurzschlußwiderstand[3])

$$\mathfrak{U}_l = \mathfrak{Z} \cdot \mathfrak{Ctg}\,\gamma \cdot l = \mathfrak{Z} \cdot j \cdot \operatorname{ctg}\gamma \cdot l = j \cdot 100 \cdot \operatorname{ctg}\omega \cdot 10^{-5} \cdot l\ \Omega$$

$$\mathfrak{U}_k = \mathfrak{Z} \cdot \mathfrak{Tg}\,\gamma \cdot l = \mathfrak{Z} \cdot j \cdot \operatorname{tg}\gamma \cdot l = j \cdot 100 \cdot \operatorname{tg}\omega \cdot 10^{-5} \cdot l\ \Omega$$

lassen sich folgende aufschlußreiche Tabellen berechnen:

1. die Beziehung zwischen Frequenz und Länge, bei der der Leerlaufwiderstand erstmalig Null und der Kurzschlußwiderstand erstmalig unendlich wird. Aus

$$\mathfrak{U}_k = j \cdot 100 \cdot \operatorname{tg}\omega \cdot 10^{-5} \cdot l = \infty \text{ folgt}$$

$$\operatorname{tg}\omega \cdot 10^{-5} \cdot l = \infty$$

$$2\pi f \cdot 10^{-5} \cdot l = \frac{\pi}{2}$$

$$f \cdot l = 25\,000$$

und hieraus

Tabelle 2.

f =	300	600	**800**	900	1200	1500	1800	2100	Hz
l =	83,3	41,7	**31,3**	27,8	20,8	16,7	13,9	11,9	km

2. für $f = 800$ Hz der Kurzschlußwiderstand in Abhängigkeit von der Länge, einmal bei vernächlässigtem C (quasistationär), einmal unter Berücksichtigung von L und C (Wellenausbreitung):

Tabelle 3.

$l =$	1	2	5	10	20	**31,3**	50	km	
$\mathfrak{U}_k =$	j 5,00	j 10,00	j 25,00	j 50,00	j 100,00	**j 156,00**	j 250,00	Ω	(quasi-stationär)
$\mathfrak{U}_k =$	j 5,00	j 10,03	j 25,52	j 54,63	j 155,74	∞	−j 74,70	Ω	(Wellen-ausbreitg.)

Die Tabellen zeigen, daß für $f = 800$ Hz bei 31,3 km bereits die vollkommene Umkehr der von den quasistationären Vorgängen her bekannten Verhältnisse eingetreten ist. Anderseits zeigt Tabelle 3, daß bis zu einem l von 10 km die Unterschiede zwischen den Werten der beiden Rechnungsweisen noch nicht sehr groß sind (für $l = 10$ km rd. 9 % Unterschied). Bei den Berliner Vorortstrecken wird die Länge eines Speiseabschnittes 6 km nicht überschreiten; die Speisestrecken auf der Stadt- und Ringbahn werden wesentlich kürzer sein. Praktisch wird man also auch im Fall der Speisung durch dritte Schiene — wenigstens bei normaler Betriebsweise — mit der einfachen Formel des quasistationären Zustands rechnen können.

Beim wirklichen Gleichrichter werden die Verhältnisse verwickelter. Mit zunehmender Belastung tritt durch die Überlappung des Stroms zweier Anoden [4] [5]), deren Größe durch die Induktivität je Phase des Gleichrichter-Transformators bestimmt ist, eine immer stärkere Verzerrung der überlagerten Wechselstromkurve auf; Zündspitzen bringen bei hohen Belastungen weitere Deformationen. Schließlich können sich Ströme der Frequenz $\frac{p \cdot f}{2}$ $\left(\text{gelegentlich auch } \frac{p \cdot f}{3} \text{ oder } \frac{2 \cdot p\, f}{3}\right)$ ausbilden, die davon herrühren, daß die Spannungsabfälle der verschiedenen Phasen des Transformators nicht vollkommen gleich sind.

Es leuchtet ein, daß nur die messende Untersuchung an tatsächlichen Gleichrichtern und Gleichrichteranlagen die zur Beurteilung und Berechnung der Fernsprechstörwirkung notwendigen Unterlagen liefern kann. Diese Fragen werden im IV. Kapitel behandelt werden.

B. Die Maßnahmen zur Verminderung der Welligkeit.

Die eleganteste „Kurvenputzvorrichtung“ ist zweifellos eine Glühkathodenröhre, deren Gitter durch den Strom $\mathfrak{I}_0$ gesteuert wird und deren Anoden-Wechselstrom in jedem Zeitpunkt dem Strom $\mathfrak{I}_0$ ent-

gegengesetzt gleich ist. Bei jeder beliebigen Belastung ergäbe eine solche Anordnung, richtig bemessen, stets vollkommen reinen Gleichstrom I_0. Daß ein derartiger Wellensauger ausführbar ist, darf angenommen werden; ob er der Anforderung nach Wirtschaftlichkeit genügt, muß man zunächst bezweifeln. Die Einführung einer Glühkathodenröhre scheint nur bei höheren Gleichspannungen, etwa über 3000 V, aussichtsreich, die zurzeit in Deutschland noch nicht angewendet werden.

Ein zweiter Weg, die Welligkeit zu vermindern besteht darin, die Hauptstörfrequenzen einzeln zu unterdrücken. Grundsätzlich ist das in der Weise möglich, daß entweder in den Strompfad Sperrkreise (Parallelschaltungen von Induktivitäten und Kapazitäten) oder zwischen

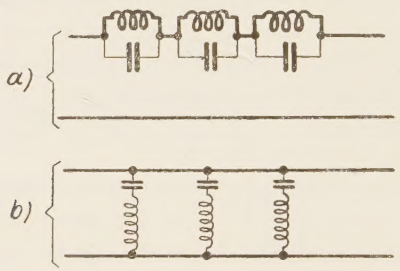


Abb. 1 Grundsätzlich mögliche Schaltungen von Wellensaugern

Plus und Minus Kurzschlußkreise, „Stromfallen“ (Reihenschaltungen von Induktivitäten und Kapazitäten) eingeschaltet werden, die auf die zu unterdrückenden Störfrequenzen abgestimmt sind (vgl. Abb. 1). Die über Wellensauger veröffentlichten Aufsätze von Jäger[6]), Zastrow und Benda[7]), Marchant[8]), Schenkel[9]) und Holling und Benda[10]) behandeln nur den zweiten Weg, der, weil der wirtschaftlichere, zurzeit allgemein angewendet wird. Zum vollständigen Wellensauger nach b) gehört jedoch noch eine Begrenzungsdrossel zwischen Gleichrichter und diesen Kreisen, sodaß der praktisch verwendete Wellensauger nach dem Schema der Abb. 2 gebaut ist. Die Begrenzungsdrossel, die, wie auch die Drosseln nach Abb. 1 a), vom Gleichstrom I_0 durchflossen wird und dementsprechend bemessen sein muß, erfüllt eine doppelte Aufgabe: einmal „begrenzt“ sie den Oberwellenstrom, dessen Größe, ohne Vorhandensein einer Drossel, allein durch das Verhältnis

$\frac{\text{Wechselspg. der betr. Frequenz}}{\text{Verlustwiderst. des betr. Res.-Kreises}}$ bestimmt, eine Zerstörung des Resonanzkreises bewirken würde. Bei 30 V Gleichrichterspannung der Frequenz 300 Hz z. B. und 0,3 Ohm Verlustwiderstand des 300er Kreises wäre der Strom im Querkreis $\mathfrak{J}_{300} = \frac{30}{0{,}3} = 100$ A (wobei vorausgesetzt wird, daß der Gleichrichter eine beliebig große Energiequelle für die Wechselströme ohne inneren Widerstand darstellt). Außerdem aber würde eine derartige Anordnung ohne Begrenzungsdrossel keine Verringerung der Welligkeit des Netzstroms bewirken, weil die generatorische Wechselspannung des Gleichrichters unvermindert, u. z. als Spannungsabfall am Verlustwiderstand des Querkreises, wiederum am Netz läge. Um überhaupt eine Verringerung der Welligkeit zu erhalten, ist es notwendig, daß die generatorische Wechselspannung auf zwei Widerstände,

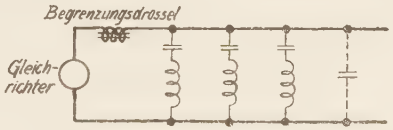


Abb. 2 Wellensauger aus Begrenzungs-drossel und Querkreisen.

einen im Strompfad und einen zwischen Plus und Minus liegenden aufgeteilt wird. Anders ausgedrückt, es ist notwendig, den (vorher vernachlässigten und praktisch sehr kleinen) inneren Widerstand des Gleichrichters für die Wechselströme zu erhöhen. Ist der Verlustwiderstand der Drossel R_0 bei einer zu unterdrückenden Frequenz x klein gegen ihren induktiven $\omega_x \cdot L_0$ und bezeichnet r_x den Verlustwiderstand des Resonanzkreises für die Frequenz x, so wird die Verminderung der Welligkeit für die Frequenz x, d. h. das Verhältnis $\frac{\mathfrak{E}_x}{\mathfrak{E}_{0x}}$, unmittelbar durch den Quotienten $\frac{r_x}{\omega_x \cdot L_0}$ gegeben:

$$\frac{\mathfrak{E}_x}{\mathfrak{E}_{0x}} = \frac{r_x}{\omega_x \cdot L_0} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

Bei kleineren Gleichströmen, etwa bis zu $I_0 = 500$ A, ist es wirtschaftlich, die Begrenzungsdrossel mit Eisen auszuführen; bei höheren

Stromstärken sind eisenfreie Luftdrosseln billiger. Gegenüber Eisendrosseln haben sie den Vorzug einer konstanten Induktivität L_0, die bei den Eisendrosseln mit wachsendem Gleichstrom I_0 infolge der Vormagnetisierung abnimmt; Abb. 4 zeigt die Kurve $L_0 = F(I_0)$, die vom Verfasser an einer 500 A-Drossel aufgenommen worden ist.

Bei einer gegebenen Begrenzungsdrossel ist die glättende Wirkung eines Wellensaugers umso größer, je kleiner die Verlustwiderstände r der Querkreise werden, je geringer also die Verlustwinkel der Querkreis-

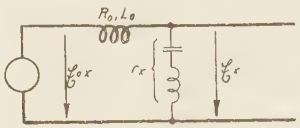


Abb. 3

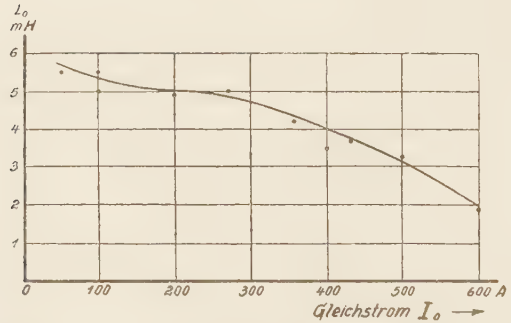


Abb. 4 $L_0 = F(I_0)$ bei einer Eisendrossel für max. 500 A

Induktivitäten (stets Luftspulen) und -Kapazitäten sind. Dabei ist jedoch folgendes zu beachten: die Resonanzkurven der Querkreise dürfen nicht so scharf sein, daß bei den praktisch vorkommenden Frequenzschwankungen des Netzes die Querkreis-Scheinwiderstände erheblich werden. In der Anlage 1 sind diese Verhältnisse eingehender erläutert. Abb. 5 gibt die ungefähren Daten eines Wellensaugers, wie er für die Berliner Vorortbahn nach Velten im Gleichrichterwerk Hennigsdorf der Deutschen Reichsbahn-Gesellschaft versuchsweise erprobt worden ist. (Die Begrenzungsdrossel L'_0 mit Eisen, Induktivität etwa 1,2 mH bei

$I_0 = 1000$ A, wurde, da bereits fest eingebaut, bei den Versuchen mit verwendet.)

Neben der Verwendung von Resonanz-Querkreisen hinter der Begrenzungsdrossel ist von Schenkel[9]) die Einschaltung einer reinen Querkapazität vorgeschlagen worden (in Abb. 2 punktiert). Eine solche Anordnung hat zweifellos eine gute Wirkung auf die höheren und höchsten Harmonischen. Wollte man auch die niederen Frequenzen

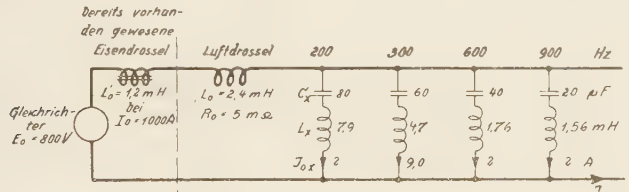


Abb. 5 Versuchs – Wellensauger Hennigsdorf

Tabelle 4.

f	200	300	600	900	Hz
$\omega (L'_0 + L_0)$	4,5	6,8	13,6	20,4	Ω
L_x	7,9	4,7	1,76	1,56	mH
C_x	80	60	40	20	µF
r_L = *)	0,12	0,064	0,038	0,037	Ω
r_x	?	0,61	?	?	Ω
$\frac{\mathfrak{E}_x}{\mathfrak{E}_{0x}} \cdot 100$	?	9,0**)	?	?	%

*) Gleichstromwiderstand der Querkreisspulen.
**) $\mathfrak{E}_{0\,300} = 61$ V, $\mathfrak{E}_{300} = 5{,}5$ V, $\mathfrak{J}_{0\,300} = 9{,}0$ A, $\mathfrak{J}_{300} = 0{,}3$ A.

mit einer Querkapazität allein in dem gleichen Maß unterdrücken, wie dies durch Resonanzkreise geschieht, so wären sehr erhebliche Kapazitäten erforderlich. Bei einem L_0 von 2,4 mH, also einem $\omega \cdot L_0$ von 4,5 Ohm bei $f = 300$ Hz, und bei einer verlangten Senkung der Welligkeit auf $^1/_{10}$ für $f = 300$ müßte der Blindwiderstand der Querkapazität 0,45 Ohm betragen, was einem C von etwa 1200 µF entspricht. Übliche Starkstromkondensatoren mit Papier oder Seide als Dielektrikum sind für

solche Kapazitäten durchaus unwirtschaftlich. — Berücksichtigt man, wie dies Zastrow und Benda[7]) tun, neben einer reinen Querkapazität die Induktivität des Netzes (Fahrleitung + Motoren), so erhält man eine „Wellenfilter-Schaltung“ mit wesentlich kleineren Kapazitätswerten (es werden 60 und 120 μF angegeben). Versuche des Verfassers allein mit reinen Querkapazitäten bis zu einigen 100 μF haben jedoch stets schlechtere Verhältnisse ergeben als die Verwendung abgestimmter Resonanzkreise, möglicherweise deshalb, weil die Netzinduktivität infolge der Änderung der Fahrzeugstellungen eine so variable Größe ist, daß sie nicht als wesentlicher Bestandteil der Schaltung mit benutzt werden kann. — Auf die Verwendung elektrolytischer Kondensatoren als Querkapazität setzt man zurzeit einige Hoffnungen. Nachteilig ist ihre geringe Durchschlagsfestigkeit, die zu Reihen-Parallelschaltungen und damit zur Aufstellung der vielfachen Nennkapazität zwingt. Ob von dieser Seite her wesentliche Änderungen in der Konstruktion der Wellensauger zu erwarten sind, wird die Zukunft zeigen. Üblich sind zurzeit nur Wellensauger des beschriebenen Typs, also Begrenzungsdrosseln von einigen mH, mit Eisen bei kleineren, ohne Eisen bei höheren Stromstärken, in Verbindung mit Resonanz-Querkreisen (meistens 3 Kreise für f = 300, 600 und 900 Hz), die aus Luftdrosseln (einige mH) in Reihenschaltung mit statischen Kondensatoren (je einige 10 μF mit Papier oder Seide als Dielektrikum) bestehen. Die Senkung der Fernsprechstörwirkung, die durch einen derartigen Wellensauger erzielt wird, beträgt im Mittel etwa 8 : 1 bis 12 : 1. Die Beziehungen zwischen Welligkeit und Fernsprechstörwirkung sind im IV. Kapitel untersucht.

Zweites Kapitel.

Die Kopplung zwischen Starkstrom- und Schwachstromsystem.

A. Grundlagen.

Die Beziehung zwischen einem induzierenden Strom $\mathfrak{J}$ und einer induzierten Spannung $\mathfrak{E}$ wird durch die Gleichung

$$\left.\begin{aligned}\mathfrak{E} &= \omega \cdot M \cdot \mathfrak{J} \\ \text{bzw.} \\ \mathfrak{E} &= \omega \cdot m \cdot l \cdot \mathfrak{J}\end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

gegeben, in der M die Gegeninduktivität (H) bzw. m die kilometrische Gegeninduktivität (H/km) und l die Näherungslänge (km) darstellt. In dem vorliegenden Fall ist M die Kopplungsgröße zwischen einem wechselstromdurchflossenen Leiter mit Erde als Rückleitung und einer gleichlaufenden ein- oder doppeldrähtigen Fernsprechleitung. Für die Gegeninduktivität zweier Einzelleitungen hat Breisig in der Theoretischen Telegraphie, S. 168 (1. Aufl.), die Formel

$$M = 2 \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot l}{d} - 1 \right) \cdot 10^{-4} \text{ H/km}$$

angegeben, nach der M allein durch die geometrischen Verhältnisse der Systeme bestimmt ist. Frequenz und Bodenleitfähigkeit geht in diesen Ausdruck nicht ein. Die nach dieser Formel berechneten Werte haben gegenüber Meßwerten z. Tl. erhebliche Abweichungen gegeben. Diese sind später nach einem Vorschlag von Brauns[11]) durch die Formel

$$M = 2 \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot l}{d} - q \right) \cdot 10^{-4} \text{ H/km}$$

berücksichtigt worden, in der der Korrekturfaktor q, je nach den geologischen Verhältnissen, zwischen 1 und 3 schwankt. Die neueren Arbeiten — über das Problem sind in den letzten zwei Jahren Veröffentlichungen von Breisig[12]), Rüdenberg[13]), Pollaczek[14]),

O. Mayr[15]), Carson[16]), Haberland[17]), Mitsuda und Kasai[18]), Lindström[19]) und Lühr[20]) erschienen — legen ihren Ansätzen für die Gegeninduktivität zweier Einzelleitungen und einer Einzel- und einer Doppelleitung einen bestimmten, endlichen Wert oder mehrere bestimmte, endliche Werte der Bodenleitfähigkeit zugrunde und gelangen unter Berücksichtigung der Stromverteilung im endlichleitfähigen Erdboden zu einem symbolisch aufzufassenden, erweiterten Begriff der Gegeninduktivität, die sich aus den z. Tl. recht schwierigen Rechnungen als eine komplexe, mit der Frequenz veränderliche Funktion ergibt. Eine Übersicht über die Gedankengänge der Arbeiten von Breisig, Rüdenberg und Pollaczek ist im Supplément à l'Annexe III der „Directives" des CCI[21]) veröffentlicht. Abb. 6 zeigt für den praktischen Gebrauch zugeschnittene Kurven der Gegeninduktivitätswerte zweier Einzelleitungen (Beträge) m_E in H/km in Abhängigkeit vom Abstand beider Systeme bei den technischen und den Sprechfrequenzen, die nach Rüdenberg gerechnet worden sind. Abb. 7 zeigt eine Kurve der Gegeninduktivität zwischen Einfach- und Doppelleitung (m_D in H/km) bei $f = 800$ Hz, gleichfalls nach Rüdenberg berechnet. Die Werte für die Doppelleitung, bei der horizontale Lage der beiden Drähte und 50 cm Schleifenbreite vorausgesetzt ist, liegen 2 bis 3 Größenordnungen unter den entsprechenden für die Fernsprecheinzelleitung, weil die von dem Starkstromsystem erzeugten Induktionslinien, die bei der Einzelleitung mit der Schleife: Fernsprechleitung — Erdrückleitung verkettet sind, bei der Doppelleitung nur die 50 cm breite Schleife der beiden Drähte durchfluten. — Systematische Versuche zur Prüfung der gerechneten M-Werte und zur Gewinnung eines größeren Versuchsmaterials sind bisher nur von Siemens & Halske ausgeführt worden; Zastrow hat über sie berichtet[22]). Die Messungen beziehen sich nur auf die Gegeninduktivitäten zweier Einzelleitungen. Ein Vergleich der gemessenen Werte mit denen, die nach Breisig und Rüdenberg gerechnet sind, zeigt immer noch nicht unerhebliche Abweichungen zwischen gemessenen und gerechneten Werten; sie bedürfen noch weiterer Untersuchungen.

B. Für die vorliegende Aufgabe wichtige Einzelfeststellungen.

Wenn die mit dem Begriff der Gegeninduktivität zusammenhängenden Fragen auch noch nicht bis ins letzte geklärt sind —

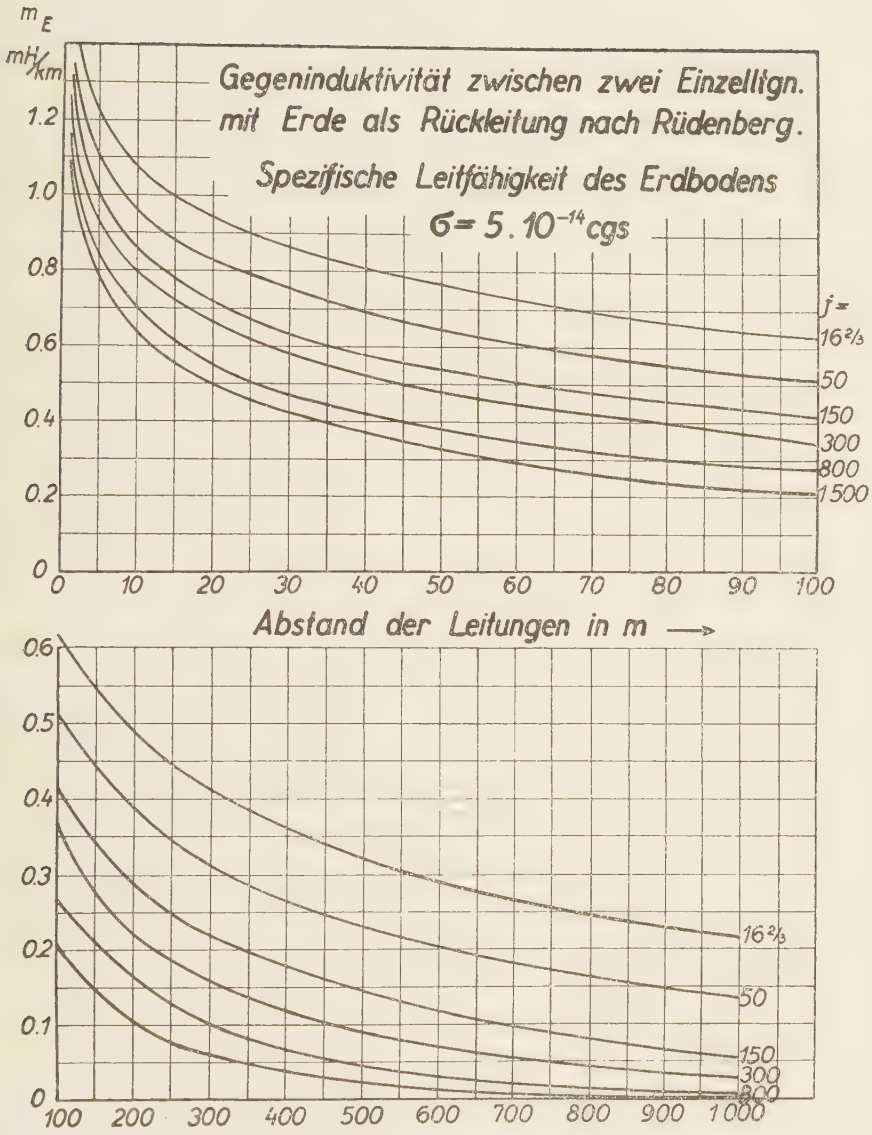

m_E
mH/km
Gegeninduktivität zwischen zwei Einzelltgn.
mit Erde als Rückleitung nach Rüdenberg.
Spezifische Leitfähigkeit des Erdbodens
$\sigma = 5 \cdot 10^{-14}$ cgs
f =
16⅔
50
150
300
800
1500
1.2
1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
Abstand der Leitungen in m ⟶
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
100 200 300 400 500 600 700 800 900 1000

Abb. 6.

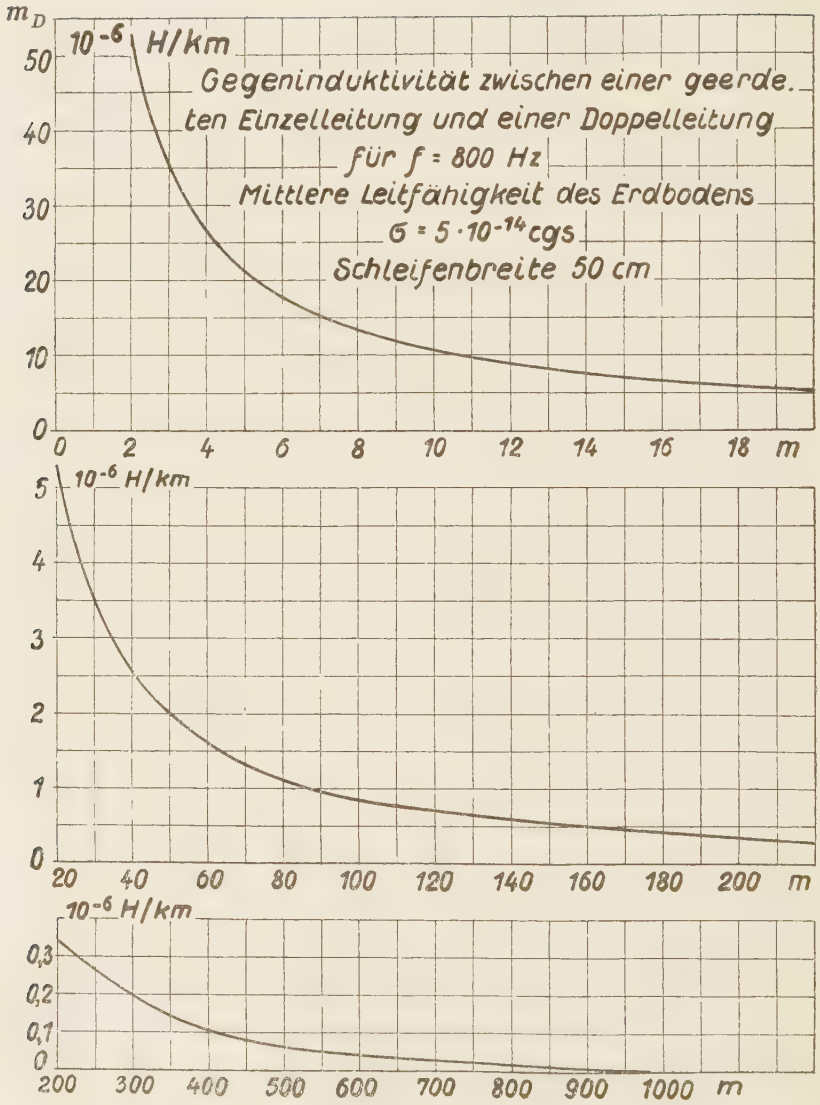

m_D
10^{-6} H/km
Gegeninduktivität zwischen einer geerde-
ten Einzelleitung und einer Doppelleitung
für f = 800 Hz
Mittlere Leitfähigkeit des Erdbodens
$\sigma = 5 \cdot 10^{-14}$ cgs
Schleifenbreite 50 cm
50
40
30
20
10
0
0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 m
10^{-6} H/km
5
4
3
2
1
0
20 40 60 80 100 120 140 160 180 200 m
10^{-6} H/km
0,3
0,2
0,1
0
200 300 400 500 600 700 800 900 1000 m

Abb. 7.

größere Versuche auf internationaler Grundlage sind im Gange —, so können gleichwohl eine Anzahl Punkte hervorgehoben und festgestellt werden, die für die vorliegende Aufgabe wesentlich sind.

a) In erster Annäherung kann man die Gegeninduktivität in Abhängigkeit von der Frequenz für einen gegebenen Abstand als konstant ansehen. Die von einem mehrwelligen Strom in einem gekoppelten System induzierte Spannung enthält bei dieser Voraussetzung ihre Harmonischen gegenüber denen des induzierenden Stroms entsprechend deren Ordnungszahl vergrößert („Veromegafachung").

b) Die neueren Rechnungen ergeben eine Frequenzabhängigkeit der Gegeninduktivität, und zwar in dem Sinn, daß mit zunehmender Frequenz die Gegeninduktivität abnimmt. Diese Abnahme ist bei größeren Abständen erheblich stärker als bei kleinen. Die Gegeninduktivitäten zweier Einzelleitungen verhalten sich z. B. bei den Frequenzen $16^2/_3$ und 1100 Hz für 20 m Abstand wie 2:1, bei 500 m Abstand wie 20:1. Diese Art der Abnahme ist praktisch wichtig und insofern günstig, als die höheren Frequenzen, wie sie von Gleichrichtern erzeugt werden und die von besonderem Einfluß auf die Sprechverständigung sind, in größeren Abständen wesentlich stärker gedämpft werden als z. B. die Grundfrequenz der Einphasenbahnen von $16^2/_3$ Hz.

c) Während die Gegenkapazität zweier Systeme, das Maß für die elektrostatische Kopplung, mit dem Abstand quadratisch abnimmt, ist die Abnahme der Gegeninduktivität, vor allem für die niederen Frequenzen, eine ganz wesentlich langsamere. Bei einer Vergrößerung des Abstands zwischen einer Einphasenbahn und einer Einfachleitung von 10 auf 50 m verringert sich die Gegenkapazität (unabhängig von der Frequenz) im Verhältnis 30:1, die Gegeninduktivität aber nur im Verhältnis 1,4:1 für $16^2/_3$ und im Verhältnis 2:1 für 800 Hz. Praktisch folgt hieraus, daß eine Abstandsvergrößerung bei Induktionsbeeinflussung ungleich weniger durchgreifend wirkt als bei kapazitiver Beeinflussung, wie sie bekanntlich bei der Einwirkung von Drehstromanlagen mit nicht fest geerdetem Nullpunkt auf Fernmeldeanlagen vorliegt.

d) In den Ausdrücken für die Gegeninduktivität hat die Höhe der beeinflußten Leitung — wenigstens innerhalb der praktisch in Frage kommenden Grenzen — keinen oder nur einen verschwindend geringen Einfluß auf das Ergebnis. Es ist also für die Größe der

Induktionswirkung zunächst gleichgültig, ob die beeinflußte Leitung in der Luft, auf oder in dem Boden verlegt ist. Im Gegensatz hierzu sind einer elektrostatischen Beeinflussung bereits auf dem Erdboden liegende Feldkabel nicht mehr ausgesetzt, ebensowenig natürlich die durch einen geerdeten Metallmantel geschirmten Luft- und Erdkabel. — Die grundsätzliche Unwirksamkeit eines Verkabelns induktionsbeeinflußter Leitungen unterliegt aber nach zwei Seiten hin einer Beschränkung. Wenn eine unsymmetrische Freileitung (Doppelleitung) durch eine symmetrische Kabel-Doppelader ersetzt wird, so verschwinden die auf das Adernpaar ausgeübten Induktionswirkungen. Diese Verhältnisse werden in dem nächsten Kapitel behandelt werden. Setzt man jedoch eine unsymmetrische Anordnung voraus, z. B. eine Doppelader mit unmittelbar angeschlossener, gegen Erde unsymmetrischer Schaltung, so wird in Kabeln mit metallischem Mantel durch die kompensierende Wirkung des im Kabelmantel fließenden Induktionsstroms die in den Adern induzierte Spannung vermindert werden. Diese Kompensationswirkung des Kabelmantelstroms ist von Krause und Zastrow eingehend untersucht worden [23]). Grundsätzlich handelt es sich um folgendes: ebenso wie in einer beiderseits geerdeten Einzelleitung wird auch in dem Kabelmantel vom Starkstromsystem eine Spannung induziert. Der in der Schleife: Mantel — Erdrückleitung fließende Strom wird nach Größe und Phase von den Widerstandsverhältnissen dieser Schleife, also im wesentlichen von denen des Kabelmantels bestimmt. Ist dessen Wirkwiderstand klein und seine Induktivität groß, so wird der Vektor des Mantelstroms gegen den der Mantelspannung um annähernd 90^0 verzögert sein. Dieser Strom induziert seinerseits in den Adern Umlaufspannungen, deren Vektoren gegen die vom Starkstromsystem in den Adern induzierten Spannungen um annähernd 180^0 verschoben sind, diese Spannungen also mehr oder weniger stark kompensieren. Es folgt aus diesen Überlegungen, daß die Kompensationswirkung frequenzabhängig ist, daß sie um so größer wird, je höhere Frequenzen es zu unterdrücken gilt. Im Hinblick auf die durch Gleichrichterbahnen verursachten Störungen ist dies als Vorteil zu buchen. — Die Kompensationswirkung von Kabeln gewöhnlicher Bauart ist beschränkt, doch kann man Sonderausführungen mit besonders hoher Kompensationswirkung herstellen. Die Mittel, um den Wirkwiderstand des Mantels zu verkleinern und

die Induktivität zu erhöhen, sind Armierung des Kabels mit blankem Cu-Draht oder -Band unter dem Bleimantel und die Bewehrung mit Bändern aus Eisen von besonders guten magnetischen Eigenschaften (Si-Eisen). Während z. B. die durch ein gewöhnliches Kabel bewirkte Verminderung der Induktionsspannung gegenüber einer Freileitung etwa 67 % beträgt, nämlich 3—4,5 V gegenüber 5—7 V/100 Akm (gemessen an einer doppelgleisigen Einphasenbahn 15 kV, $16^2/_3$ Hz, ohne Schienenverbinder, in 10 m Abstand), wird durch Sonderkabel mit besonders guter Kompensationswirkung die Spannung unter gleichen Verhältnissen auf etwa 1,5—2 V = 30 % der in einer Freileitung induzierten vermindert. Es kann kein Zweifel bestehen, daß die Kompensationswirkung bei den Gleichrichterfrequenzen noch wesentlich größer ist und daß z. B. bei f = 800 Hz Senkungen der Spannung auf 10 und 5 % von derjenigen in einer Freileitung induzierten erreicht werden können. — Derartige Kabel sind längs Einphasenbahnen mehrfach zur Ausführung gekommen [24]). Im Einflußbereich von Gleichrichterbahnen sind sie bisher noch nicht ausgelegt worden.

e) Eine ähnliche Rolle wie der Kabelmantelstrom spielt der Schienenstrom von Wechselstrombahnen bzw. der Wechselstromanteil des Schienenstroms von Gleichrichterbahnen. Da bei den längs einer Bahn geführten Leitungen der Abstand: Schienen — Kabel in derselben Größenordnung liegt wie der Abstand: Schienen — Freileitung, so ist auch die Kompensationswirkung des Schienenstroms auf Kabel und Freileitung annähernd die gleiche. Ihre Größe hängt jedoch von einer ganzen Reihe von Umständen ab, deren Beiträge zum Teil schwanken und bisher im einzelnen noch nicht näher untersucht worden sind. Zahl und Zustand der Gleise, Schienenprofil, Art der Bettung, Bodenleitfähigkeit und vor allem Art und Ausführung von Schienenverbindungen und -verbindern haben auf die Größe der Kompensationswirkung erheblichen Einfluß. Jäger hat über Schienenverbinder einige Versuchszahlen veröffentlicht [6]). Durch das Anbringen kupferner Längsverbinder wurde z. B. an einer Einphasenbahn bei einem bestimmten Fahrstrom die induzierte Spannung in einer Freileitung von 100 auf 62 % vermindert. Bei normaler Laschung ohne Längsverbinder läßt sich die Kompensationswirkung nur für einen bestimmten Wert des Fahrstroms angeben; der Übergangswiderstand der Laschen ist nämlich infolge einer Art Frittwirkung

vom Strom abhängig. Außerdem nimmt er mit zunehmender Lebensdauer der Anlage zu. — Bei Messungen, die der Verfasser an der Strecke Berlin—Tegel—Velten ausgeführt hat, ergab sich bei zweigleisiger Strecke normaler Bauart mit geschweißten kupfernen Schienenverbindern eine Kompensationswirkung des Schienenstroms von etwa 50 %.

Man erkennt aus alledem, daß es praktisch nicht möglich ist, die Größe einer induzierten Spannung mit Hilfe der Gegeninduktivitätsformeln allein auch nur einigermaßen genau zu bestimmen, ehe nicht eine ausreichende Kenntnis der Kompensations- usw. Faktoren vorliegt. Umfangreiche Messungen werden hierzu noch erforderlich sein.

Die wichtigsten Punkte, die sich auf die elektromagnetische Kopplung von Starkstrom- und Schwachstromanlagen beziehen, seien noch einmal kurz zusammengestellt:

a) Bei einer als frequenzunabhängig vorausgesetzten Gegeninduktivität ist eine induzierte mehrwellige Spannung gegenüber dem sie induzierten Strom „veromegafacht";

b) die tatsächlich vorhandene Frequenzabhängigkeit tritt besonders bei größeren Abständen (von einigen hundert m an) als Dämpfung der höheren (Sprech)frequenzen in Erscheinung;

c) eine Abstandsvergrößerung ist viel weniger wirksam als bei kapazitiver Beeinflussung;

d) Verkabelung bewirkt nur mittelbar eine Verminderung der induzierten Spannungen durch die kompensierende Wirkung des Kabelmantelstroms. Diese Wirkung kann bei Sonderausführungen, vor allem bei den höheren Frequenzen, recht erheblich werden;

e) auch die Schienen bewirken in benachbarten Leitungen (Frei- und Kabelleitungen) Spannungssenkungen durch die kompensierende Wirkung des Schienenstroms.

Drittes Kapitel.

Die Unsymmetrie.

Mit dem Begriff „Unsymmetrie“ wird eine Reihe verschiedenartiger Probleme schwachstromtechnischer Natur bezeichnet, welche im einzelnen zu untersuchen die Aufgabe dieses Kapitels ist. — Bedeutung hat der Begriff Unsymmetrie nur bei Doppelleitungen (und Vierern); im Sinn von S. 1 sind Einzelleitungen von vornherein als stets vollkommen unsymmetrisch zu bezeichnen. Für die Untersuchungen dieses Kapitels kommen sie also nicht in Frage.

Es ist zu unterscheiden zwischen einer Unsymmetrie gegen Erde (Erdunsymmetrie, Gleichgewichtstörung) und einer Unsymmetrie gegen die beeinflussende Starkstromanlage, die im folgenden „Querunsymmetrie“ genannt werden soll*). Bei der Gleichgewichtstörung ist zu unterscheiden zwischen der Erdunsymmetrie der Leitung (der ganzen Leitung) und der Unsymmetrie einer angeschlossenen Schaltung; Querunsymmetrie hingegen kann nur eine Leitung (und zwar nur auf der Beeinflussungsstrecke) besitzen. Geräuschunsymmetrie schließlich ist eine Größe, die die Symmetrie des ganzen zur Untersuchung stehenden Systems kennzeichnet, also durch die beiden Größen Erd- und Querunsymmetrie bestimmt wird. Für das Auftreten einer Geräuschspannung ist das Vorhandensein einer Geräuschunsymmetrie stets eine notwendige Voraussetzung.

Damit die von einer Starkstromanlage ausgehende Induktionswirkung keine Störung in einem im Einflußbereich gelegenen Fernsprechsystem hervorrufe, ist es notwendig, daß dessen Geräuschunsymmetrie Null ist. Diese Bedingung wird im allgemeinen dann

*) Eine doppeldrähtige Freileitung zum Beispiel, deren Drähte aus gleichem Stoff und von gleicher Stärke sind und bei der beide Zweige gleiche Ableitung besitzen, hat vollkommenes Gleichgewicht, wenn ihre Zweige in gleicher Höhe über dem Erdboden angeordnet sind; gegen einen seitlich liegenden dritten Leiter, etwa gegen einen Fahrdraht, ist die Leitung querunsymmetrisch.

erfüllt sein, wenn die die Geräuschunsymmetrie bildenden Komponenten einzeln Null sind, d. h. wenn A das System vollkommenes Gleichgewicht gegen Erde besitzt und wenn B die Leitung keine Querunsymmetrie aufweist. Da in den praktischen Fällen für die Störungsfreiheit eines Systems das Verschwinden beider Größen Voraussetzung ist, muß jede von ihnen untersucht werden.

A. Gleichgewicht.

Bezeichnet man die Scheinwiderstände gegen Erde der Zweige a und b eines Systems mit $\Re_a$ und $\Re_b$, so wird der verhältnismäßige Unterschied beider Scheinwiderstände als Unsymmetrie gegen Erde (Gleichgewichtstörung) u_e definiert:

$$u_e = \frac{\Re_a - \Re_b}{\frac{1}{2}(\Re_a + \Re_b)} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

Zunächst werde eine Doppelleitung untersucht, die beiderseits mit je einem Fernhörer belastet sei und durch geeignete Maßnahmen keine Unsymmetrie gegen die beeinflussende Starkstromanlage besitze (Querunsymmetrie Null). Ist auch $u_e = 0$, so wird voraussetzungsgemäß keine Störung des Systems auftreten; hat u_e einen von Null verschiedenen Wert, so ist nach einer in der Anlage 2 wiedergegebenen Rechnung — sie ist erstmalig von Klewe ausgeführt worden und bisher noch nicht veröffentlicht — die Störspannung (Geräuschspannung) das $u_e/4$-fache der in einer Einfachleitung induzierten Längsspannung $\mathfrak{E}_l$, also

$$Gspg_l = u_e/4 \cdot \mathfrak{E}_l \text{ und mit Gl. (2) (S. 11)}$$

$$Gspg_l = u_e/4 \cdot \omega \cdot m_E \cdot 1 \cdot \mathfrak{J} \cdot 10^{-3} \text{ mV} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

Diese ursprünglich für die „symmetrische“ Doppelleitung abgeleitete Beziehung, bei der u_e durch Leitungsunsymmetrie hervorgerufen wird, hat offenbar auch Gültigkeit bei verwickelten Systemen mit galvanisch angeschlossenen, erdunsymmetrischen Schaltungen, wofern nur zwischen a und b ein Hörer liegt. Sind erdunsymmetrische Schaltungen an eine an sich vollkommen symmetrische Doppelleitung mittels Übertrager angeschlossen, so ist das System frei von Störungen. Vorerst seien jedoch noch einige Bemerkungen zu den symmetrischen Doppelleitungen gemacht.

In den Ausdrücken für die Scheinwiderstände sind, wie bekannt, alle vier eine Leitung kennzeichnenden Größen R, G, L und C enthalten. Um vollkommene Symmetrie gegen Erde zu erzielen, ist in praxi die bezügliche Gleichheit aller vier Werte der beiden Zweige notwendig. Bei Kabeln wird diese Forderung im allgemeinen erfüllt sein; sind die von einer Starkstromanlage ausgehenden Induktionswirkungen besonders stark, so kann man die Symmetrie durch Erdkapazitätsausgleich [25]) verbessern. Dieser Ausgleich wird vor allem für Fernkabel in Frage kommen, an deren Störungsfreiheit wegen ihrer Bedeutung für den zwischenstaatlichen Verkehr besonders hohe Anforderungen gestellt werden. — Bei Freileitungen liegen die Verhältnisse ungünstiger. Um eine möglichste Gleichheit der Widerstandswerte zu erzielen, sind sowohl in den Directives des C C I (Titre I) als auch in den deutschen „Drehstromleitsätzen“ [26]) (Abschnitt II A) und in den „Bahnleitsätzen“ [27]) (Abschnitt II A) besondere Bestimmungen vorgesehen. Auch über die Ableitung, die naturgemäß starken, durch die Witterung bedingten Schwankungen unterworfen ist, finden sich an diesen Stellen verschiedene Bestimmungen, auf die im einzelnen nicht weiter eingegangen werden soll. Die Unterschiede der Kapazitäten und Induktivitäten gegen Erde, die davon herrühren, daß man im allgemeinen die beiden Zweige einer Leitung verschieden hoch anordnet, sollen nach den Directives durch „Schrauben“ oder „Kreuzen“ beseitigt werden. In Deutschland ist allein das Kreuzen üblich; die mit dem Kreuzungsschema zusammenhängenden Fragen werden unter B behandelt werden.

Die Verfahren zur Messung des Gleichgewichts sind von Klewe [28]) untersucht worden. Der Annexe I der Directives basiert im wesentlichen auf dem die Unsymmetrie betreffenden Abschnitt dieses Aufsatzes. Alle diese Verfahren sind jedoch zunächst nur für die Messung von Leitungen entwickelt worden. Sie setzen voraus, daß die Erdunsymmetrie nicht erheblich ist, so daß in den Rechnungen statt $^1/_2 \cdot (\mathfrak{R}_a + \mathfrak{R}_b)$ ein Mittelwert $\mathfrak{R}$ benutzt werden kann. Ein Verfahren, um die u. U. erhebliche Unsymmetrie von Schaltungen zu bestimmen, ist in der Anlage 3 angegeben (s. auch S. 23). Die Messungen des Gleichgewichts von Leitungen werden entweder mit Hilfe einer veränderbaren Eichleitung oder mittels Spannungsteilers mit niedrigem bzw. hohem Widerstand ausgeführt. Die Spannungsteiler sind unmittelbar in Prozenten Unsymmetrie geeicht; die Eich-

leitung liefert einen Dämpfungswert b, aus dem die Unsymmetrie nach der Gleichung

$$u_e = 2 \cdot e^{-b}$$

ermittelt werden kann. Die Kurve $u_e = F(b)$ ist in Abb. 8 dargestellt. (An sich könnte natürlich auch die Eichleitung in Prozenten Unsymmetrie geeicht werden.)

Als zulässigen Wert für die Unsymmetrie geben die Directives „à titre d'indication provisoire" ein u_e von höchstens 4 % an (entspr. $b \geq 4$); der gleiche Grenzwert gilt auch für die Leitungen der Deutschen Reichspost. Der Wert bedeutet mit Rücksicht auf Gl. 4, daß 1 % der

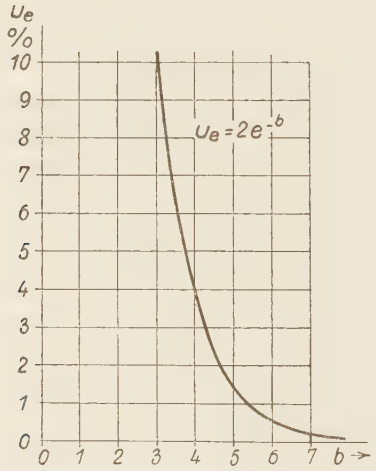


Abb. 8. $U_e = F(b)$.

Längsspannung als Geräuschspannung am Fernhörer wirksam wird. Bei ordnungsmäßig gebauten und instandgehaltenen Leitungen wird dieser Wert im allgemeinen aber nicht erreicht.

Die vorstehend gemachten Bemerkungen zu den symmetrischen Doppelleitungen sind ohne weiteres auf Fernleitungen anzuwenden, da diese entweder mit Übertragern abgeschlossen sind oder mit einfachen, erdfreien Schaltungen betrieben werden.

Neben den Fernleitungen ist als zweite Gruppe die der Verbindungsleitungen (Orts-Verbindungs-, Schnellverkehrs-, Netzgruppenleitungen u. a.) zu untersuchen. Bei der Entwicklung der

mannigfachen Schaltungen wird von vornherein im Hinblick auf eine Starkstrombeeinflussung möglichste Symmetrie während der Sprechstellung angestrebt; gleichwohl läßt sich eine solche in manchen Fällen aus wirtschaftlichen Gründen nicht erreichen. Um bei Verbindungsleitungen mit erdunsymmetrischen Schaltungen das Auftreten von Störungen hintanzuhalten, ist in den deutschen Leitsätzen bei „Fernsprechleitungen für den Schnellverkehr und für Netzgruppen“ „nach Möglichkeit“ Übertragerabschluß gefordert.

Im Ortsverkehr sind es in Deutschland die vom Amt über Erde gespeisten Nebenstellenanlagen, die infolge ihrer stark erdunsymmetrischen Schaltungen einer induktiven Beeinflussung, namentlich einer solchen durch die mit Gleichrichtern gespeisten Straßenbahnen der Städte, besonders ausgesetzt sind. Da die durch Gleichrichter verursachten Störungen von Nebenanschlüssen großen Umfang

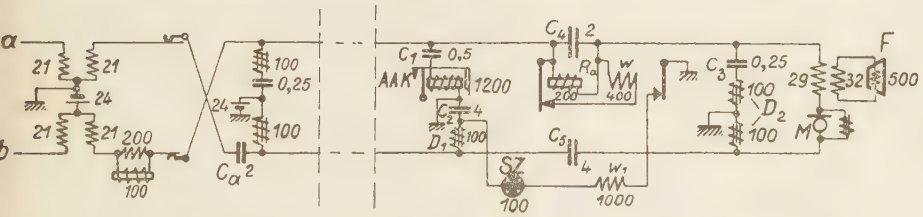


Abb. 9. Klappenschrank ZB 13. Sprechstellung: Amt-Hauptstellung.

angenommen haben, besitzen die Fragen nach der Beseitigung dieser Störungen große praktische Bedeutung. Sie sollen deshalb an dieser Stelle eingehender behandelt werden.

Abb. 9 zeigt die Schaltung des am häufigsten verwendeten Nebenstellenapparates (Klappenschrank ZB 13) bei Sprechstellung [29]). Hier ist die Möglichkeit eines Übertragereinbaus mit Rücksicht auf die Mikrophonspeisung sowie auf die Gleichstromsignalisierung nicht möglich. — Die Messung des Gleichgewichts einer derartigen Schaltung ist wegen ihrer erheblichen Unsymmetrie mit den auf S. 21 angegebenen Verfahren, wie erwähnt, nicht zulässig; diese Verfahren sind aber auch deshalb nicht anwendbar, weil die Spulen und Relais zur Erzielung richtiger Werte mit den betriebsmäßigen Gleichstrom-AW vormagnetisiert sein müssen. Vom Verfasser ist deshalb zur Untersuchung des Gleichgewichts vollständiger Schaltungen die in der Anlage 3 beschriebene Anordnung angegeben worden. Mit ihr hat

sich beim Klappenschrank ZB 13 die Erdunsymmetrie bei f = 800 Hz zu 120 % bestimmen lassen. (Größtmögliche Unsymmetrie [bei Einzelleitungen] 400 %)

Welche Mittel stehen zur Beseitigung oder Verminderung derartig großer Unsymmetrien bei den Nebenstellen zu Gebote? Die Entwicklung einer zweiadrigen symmetrischen Nebenstellenschaltung mit Amtsspeisung über Erde ist bisher noch nicht gelungen. Schwachstromseitig mögliche Maßnahmen hingegen sind die folgenden:

1. Man ersetzt die Amtsspeisung über Erde durch bei den Teilnehmern aufgestellte Ortsbatterien. Der allgemeinen Verwirklichung dieser Möglichkeit stehen die Bedenken entgegen, die vor etwa 25 Jahren zur Aufgabe des OB-Betriebs und Einführung der zentralen Speisung geführt haben.

2. Es wird über eine dritte Ader gespeist (besondere Erdrückleitung). Die Beschreitung dieses Weges stößt wirtschaftlich und auch technisch auf große Schwierigkeiten. Von der Gesamtzahl der deutschen Sprechstellen im Wirtschaftsjahr 1926 [30]) (2688495) betrug die Zahl der Nebenanschlüsse 992210 = 36,9 %; in den größeren Ortsnetzen des Deutschen Reichs sind sogar 43,4 % aller Sprechstellen Nebenanschlüsse. Die allgemeine Speisung über dritte Adern würde also eine ganz außerordentliche Vergrößerung der Ortsnetze bedeuten. Nicht möglich ist die Verwendung einer gemeinschaftlichen dritten Ader für mehrere Nebenanschlüsse mit Rücksicht auf Spannungsabfall und Übersprechen.

3. Die Unsymmetrie der Nebenstellenschaltung, die in der Hauptsache durch die Gleichstrom-Blockierungskondensatoren C_4 und C_5 (s. Abb. 9) verursacht wird, kann beim handbedienten ZB-Betrieb durch den Einbau einer Drossel in die Betriebserde des Teilnehmers vermindert werden. Da der Sprechverkehr sich stets über beide Adern abwickelt, ist die Einschaltung einer Induktivität an dieser Stelle zulässig; für die Störströme stellt sie überdies einen erheblichen zusätzlichen Widerstand dar. Die Drossel muß einen geringen Gleichstromwiderstand haben (mit Rücksicht auf die Zeichengebung und die Verringerung des Mikrophon-Gleichstroms) und muß bei der betriebsmäßigen Vormagnetisierung (etwa 50 mA) möglichst hohe Induktivität besitzen. Der Grad der durch derartige Drosseln erzielten Geräuschverminderung — eine vollkommene Beseitigung der Geräusche wäre nur durch eine unendlich große Drossel möglich —

hängt von der Größe der Induktivität ab; diese wiederum ist in erster Linie eine Preisfrage. Als brauchbar erwiesen haben sich z. B. folgende Drosseln: die bei der Deutschen Reichspost gebräuchliche „Drossel großer Form", 100 Ohm Gleichstromwiderstand, Induktivität bei 50 mA Gleichstrom 1 H, Geräuschsenkung von 100 % ohne Drossel auf etwa 30 %, Preis je Stück 2,60 Mk; ferner eine Körtingdrossel, Sonderausführung, etwa 90 Ohm, Induktivität bei 50 mA rd. 16 H, Geräuschsenkung von 100 auf 10—5 %, Preis je Stück 28.— Mk.

Die Wirksamkeit von Drosseln ist bisher nur bei den Anlagen ZB 13 erprobt und festgestellt worden. Bei Reihenanlagen mit mehreren Amtsleitungen und bei größeren, amtsgespeisten Nebenstellen hat eine Drossel zunächst versagt, weil Nebensprechen auftrat, auch wenn in die Erde jeder Amtsleitung je eine Drossel eingebaut wurde. Es ist nicht zu übersehen, ob sich in allen Fällen bei den Schaltungen Punkte angeben lassen, an denen Drosseln mit symmetrieverbessernder Wirkung eingebaut werden können, ohne andere Schwierigkeiten hervorzurufen. Bei der großen Anzahl der verschiedenen im Betrieb befindlichen Nebenstellenschaltungen erscheint dies immerhin zweifelhaft.

Eine andere wichtige Frage, die noch der Klärung bedarf, ist die, ob Drosseln im SA-Betrieb auf die Wählvorgänge einwirken. Auch bei den neuesten SA-Schaltungen von amtsgespeisten Nebenanschlüssen erfolgen die Wählvorgänge über Erde, können also durch eine Drossel verändert werden. Die bisher im Betrieb gemachten Beobachtungen widersprechen sich. In einem Ortsnetz ist einwandfrei beobachtet worden, daß die Einschaltung einer Drossel Fehlwahl zur Folge hatte; in einem anderen SA-Netz hatte sie keinen ungünstigen Einfluß. Es erscheint sogar nicht ausgeschlossen, daß eine Drossel u. U. eine günstige Wirkung auf die Gestalt der Stromstöße haben kann. Diese Fragen unterliegen zur Zeit der Prüfung.

Mit Sicherheit bedeuten Drosseln eine gewisse Verschlechterung insofern, als durch ihren Einbau die Gleichströme (Mikrophonspeisung, Signalisierung) geschwächt werden; es bedeutet dies Verkürzung der Reichweite von Nebenanschlüssen, bzw. bei bestehenden Anlagen erhöhte Sprechdämpfung, unsichere oder ganz aussetzende oder falsche Zeichengebung.

Ob ein Einbau von Drosseln — in kleinerem oder größerem Ausmaß — als störungsvermindernde Maßnahme in Frage kommen kann, ist zur Zeit noch nicht zu entscheiden.

4. Es sind Versuche mit Resonanz-Sperr- und Kurzschlußkreisen gemacht worden, wie sie im I. Kapitel unter B angegeben sind. Die Ergebnisse waren durchaus unbefriedigend. Die Sperrglieder wurden in die Erdleitung eingebaut, die „Fallen" zwischen die beiden Leitungszweige geschaltet. Obgleich die Sperrkreise Luftspulen besaßen und eine gute Sperrwirkung für die berechneten (niederen) Frequenzen ($f = 300$ und 600 Hz) aufwiesen, war die durch sie verursachte Geräuschverminderung gering. Der Grund hierfür dürfte mit den Fragen zusammenhängen, die die Störempfindlichkeit des Ohrs für die verschiedenen Frequenzen betreffen; diese sind im IV. Kapitel behandelt. — Die mangelhafte Wirkung von Querkreisen erklärt sich nach dem im I. Kapitel Gesagten ohne weiteres aus dem Fehlen einer Begrenzungsdrossel, von deren Einbau mit Rücksicht auf die Sprechströme abgesehen werden muß. Überdies würden derartige Kreise mit den störenden auch zugleich die entsprechenden Frequenzen des Sprachspektrums unterdrücken, was Verzerrungen der Sprache und verminderte Verständlichkeit zur Folge hätte.

Der Inhalt dieses Abschnitts sei in der Form von Stichworten nochmals zusammengestellt:

Erdunsymmetrie (Gleichgewichtstörung): $$u_e = \frac{\Re_a - \Re_b}{\frac{1}{2}(\Re_a + \Re_b)} \quad . \; . \quad (3)$$

Meßbar: bei Leitungen mittels veränderbarer Eichleitung oder mittels Spannungsteilers mit hohem bzw. niedrigem Widerstand; bei Schaltungen mit großer Unsymmetrie nach Anlage 3.

Geräuschspannung infolge Erdunsymmetrie:

$$Gspg_1 = u_e/4 \cdot \omega \cdot m_E \cdot l \cdot \Im \cdot 10^{-3} \text{ mV} \quad . \; . \; . \; . \quad (4)$$

Kabelleitungen: im allgemeinen symmetrisch, unter Umständen Erdkapazitätsausgleich.

Freileitungen: gleicher Widerstand, gleichmäßige Ableitung; Kreuzen (Schrauben); $u_e \leqq 4\,\%$.

Fernleitungen: erdfreie Schaltungen oder Übertragerabschluß.

Verbindungsleitungen: teils symmetrische, teils unsymmetrische Schaltungen; bei letzteren nach Möglichkeit Übertragerabschluß.

Teilnehmerleitungen: Störungen nur bei amtsgespeisten Nebenanschlüssen. Abhilfe möglich durch 1. Ortsbatterien, 2. dritte Adern, 3. Drosseln?; nicht möglich durch Sperrglieder oder Querkreise.

B. Querunsymmetrie.

Im ersten Abschnitt dieses Kapitels ist auseinandergesetzt worden, daß in einer Doppelleitung durch den Strom $\mathfrak{J}$ einer benachbarten Starkstromanlage eine Längsspannung $\mathfrak{E}_l = \omega \cdot m_E \cdot l \cdot \mathfrak{J}$ induziert wird, ferner, daß bei einer Erdunsymmetrie u_e der Doppelleitung, Querunsymmetrie Null vorausgesetzt, die Geräuschspannung infolge Erdunsymmetrie nach der Gl. (4): $Gspg_l = u_e/4 \cdot \omega \cdot m_E \cdot l \cdot \mathfrak{J}$ zu berechnen ist.

Setzt man anderseits eine Doppelleitung voraus, die vollkommenes Gleichgewicht ($u_e = 0$) besitzt, jedoch eine Unsymmetrie gegen die Starkstromanlage, die durch die Gegeninduktivität $m_D \cdot l'$ gekennzeichnet sein soll (vgl. S. 28), so wird infolge der Querunsymmetrie nach Gl. (2) eine Querspannung (Schleifenspannung) bestimmt werden können, die in vollem Betrage als Geräuschspannung wirkt:

$$Gspg_q = \omega \cdot m_D \cdot l' \cdot \mathfrak{J} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$

Besitzt die Leitung sowohl Erd- als auch Querunsymmetrie, so wird die Geräuschspannung ungünstigstenfalls die arithmetische Summe beider Einzelbeträge sein, so daß allgemein für die Geräuschspannung in einer Doppelleitung gilt:

$$Gspg_D = Gspg_l + Gspg_q = \omega \cdot (u_e/4 \cdot m_E \cdot l + m_D \cdot l') \cdot \mathfrak{J} \cdot 10^{-3}\ \text{mV} \quad . \quad (6).$$

Die Ableitung dieser wichtigen Formel ist möglich, ohne den Begriff der Querunsymmetrie genau zu umreißen. Es besteht jedoch keine Schwierigkeit, die Querunsymmetrie zu definieren als

$$u_q = \frac{\text{Schleifenspannung einer Doppelleitung mit } u_e = 0}{\text{induzierte Längsspannung}}$$

$$= \frac{Gspg_q}{\mathfrak{E}_l} = \frac{\omega \cdot m_D \cdot l' \cdot \mathfrak{J}}{\omega \cdot m_E \cdot l \cdot \mathfrak{J}} = \frac{m_D \cdot l'}{m_E \cdot l} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (7);$$

die Querunsymmetrie ist hiernach das Verhältnis der wirksamen Gegeninduktivität zwischen Einfach- und Doppelleitung zur Gegeninduktivität zwischen Einfach- und Einfachleitung, wobei für den Ausdruck $m_D \cdot l'$ auf S. 28 verwiesen werden muß. Mit Berücksichtigung von Gl. (7) kann Gl. (6) in der Form

$$Gspg_D = \omega \cdot (u_e/4 + u_q) \cdot m_E \cdot l \cdot \mathfrak{J} \cdot 10^{-3}\ \text{mV} \quad . \quad . \quad . \quad (6\,a)$$

geschrieben werden.

Handelt es sich um eine Leitung, die im allgemeinen Fall Geräuschspannungen sowohl infolge der Erdunsymmetrie und der Längs-

spannung als auch infolge der Querunsymmetrie aufweist, so definiert Küpfmüller[31]) als Geräuschunsymmetrie das Verhältnis

$$u_g = \frac{\text{Spg Ader/Ader}}{\text{Spg Ader/Erde}} = \frac{\text{Gspg}_D}{\mathfrak{E}_1} \quad \ldots\ldots (8),$$

welches an einer beeinflußten Doppelleitung mit dem Geräuschunsymmetriemesser bestimmt werden kann.

Bei der Berechnung der Störspannungen induzierter Doppelleitungen nach Gl. (6) ist es von erheblicher Bedeutung, zu wissen, welche Faktoren die Größe der beiden Summanden Gspg_l und Gspg_q bestimmen und durch welche Maßnahmen diese verkleinert werden können. Hierzu ist zunächst die Gegeninduktivität zwischen Einfach- und Doppelleitung $m_D \cdot l'$ näher zu untersuchen. Hat die Doppelleitungsschleife horizontale Lage, eine Schleifenbreite von 50 cm, wie sie mit Rücksicht auf Vierer der Berechnung von m_D zugrunde gelegt ist, und keine Kreuzungen oder Schraubungen, so ist $m_D \cdot l'$ ohne Einschränkung durch $m_D \cdot l$ zu ersetzen. Kommen an der Näherung aus besonderen Gründen keine Vierer vor und sind keine solchen zu erwarten, so könnte bei sonst gleichen Verhältnissen m_D durch $m_D/2$ ersetzt werden (25 cm Schleifenbreite, vergl. die Rechnung in der Anlage 4).

Stände die Leitungsschleife nach einem Vorschlag von Rüdenberg[32]) senkrecht, so würde bei nicht zu kleinem Abstand der Fernsprechleitung von der beeinflussenden Anlage m_D annähernd Null werden, weil dann die Leitungszweige auf der nämlichen Äquipotentialfläche lägen. Praktisch wird diese Ausführung aus bautechnischen Gründen (Berührungsgefahr der Leitungen bei Rauhreif) wohl nicht in Frage kommen. Wesentliche Bedeutung hat jedoch das Kreuzen und das Schrauben von Leitungen, Verfahren, die mit Rücksicht auf ihre gegenseitige Entkopplung (Wahrung des Fernsprechgeheimnisses) und zum Schutz gegen die Einwirkungen etwaiger am gleichen Gestänge verlaufenden Telegraphenleitungen grundsätzlich angewendet werden. Es ist ohne weiteres einzusehen, daß die Querunsymmetrie einer einmal gekreuzten Leitung mit beliebiger Neigung der Schleifenebene, gleiche Länge der Kreuzungsabschnitte und konstanten Abstand von der Starkstromanlage vorausgesetzt, Null ist, weil die in dem ersten Kreuzungsabschnitt induzierte Querspannung durch die gleichgroße, jedoch um 180^0 verschobene des zweiten Abschnitts kompen-

siert wird. Bei einer zweimaligen Schraubung der Drähte um je 90^0 liegen die Verhältnisse ebenso. Es ist dieses der Grund, warum bei Kabeln, bei denen die Adern verhältnismäßig eng geschraubt sind, keine Querunsymmetrie und also auch keine Beeinflussung infolge Querspannungen auftritt. Überdies würde, auch bei nicht verdrallten Adern, die sehr geringe Schleifenbreite ein praktisch zu vernachlässigendes m_D zur Folge haben. Da in Deutschland bei Freileitungen nur Kreuzungsverfahren angewandt werden, soll auf die Schraubung nicht weiter eingegangen werden.

Bestünde nicht der Zwang, auf die innere Entkopplung der Leitungen Rücksicht zu nehmen, so könnte, auch bei wechselnden Abständen zwischen Starkstromanlage und Fernsprechleitung, ein Kreuzungsschema entworfen werden, bei dem die $Gspg_q$ für die ganze Länge der Näherung, konstanten Zustand der Starkstromanlage (gleichen Strom $\mathfrak{J}$) auf der ganzen Näherungslänge vorausgesetzt, Null wird. Tatsächlich liegen die Verhältnisse jedoch so, daß alle Freileitungen, ohne Rücksicht auf etwaige Starkstrombeeinflussung, nach einem Kreuzungsschema gebaut werden, das die innere Entkopplung der Leitungen gerade noch mit Sicherheit gewährleistet. Pinkert hat dieses Verfahren in Deutschland entwickelt[33]); die grundlegende Veröffentlichung ist vom Jahr 1919. Ohne auf Einzelheiten eingehen zu wollen, sei hier folgendes bemerkt: Pinkert geht von der Voraussetzung aus, daß auf einem Freileitungsstück von 80 km Länge (etwa $^1/_4$ Wellenlänge der üblichen Bezugsfrequenz 800 Hz) die Vorgänge noch als quasistationär angesehen werden können. Innerhalb dieser Grundlänge, auf der sich das Kreuzungsverfahren aufbaut, sind die Leitungen systematisch derart gekreuzt (genauer: die Zweige von Stammleitungen derart gekreuzt und die Stämme von Vierern derart „geplatzwechselt"), daß jeder Sprechweg gegen alle übrigen und gegen äußere Leitungen ausgeglichen ist. In Abb. 10 (S. 30) ist der Ausgleich für 15 Sprechwege durchgeführt. Der am wenigsten gekreuzte Sprechweg (Nr. 1) hat nur eine Kreuzung, bei km 40; diese ungekreuzte Länge von 40 km wird als Störungslänge bezeichnet (vgl. § 31 der Drehstromleitsätze). Der am häufigsten gekreuzte Sprechweg (Nr. 15) hat 16 Kreuzungen, bei km 5, 10, 15 . . ., also im Abstand von je 5 km; dieser kürzeste Abstand zweier Kreuzungsgestänge wird als Kreuzungsabschnitt bezeichnet (vgl. § 7 der Drehstromleitsätze). — Die höchste $Gspg_q$ muß offenbar im Sprech-

weg 1 auftreten, der auf der Grundlänge nur 2 Kreuzungsabschnitte gleich der Störungslänge besitzt, und zwar dann, wenn die beeinflussende Starkstromanlage — immer konstanten Abstand von der Linie und konstanten Strom $\Im$ vorausgesetzt — eine Länge genau gleich der Störungslänge des Verfahrens aufweist und diese Länge überdies gerade mit der Länge eines der beiden Kreuzungsabschnitte des Sprechwegs 1 zusammenfällt. In allen anderen Fällen, sowohl bei einer anderen Lage der Näherung bezüglich der Grundlänge als auch bei größerer oder kleinerer Länge der Näherung, ist die Beeinflussung geringer. Um die in allen Fällen mögliche höchste Störwirkung zu erfassen, genügt es somit, bei der Berechnung der $Gspg_q$ mit der Störungslänge l_s zu rechnen, falls die Länge der Näherung

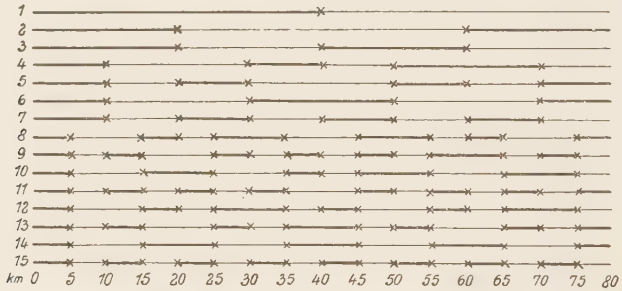


Abb. 10. Kreuzungsschema für 15 Sprechwege; Störungslänge 40 km.

die Störungslänge überschreitet; andernfalls ist die wirkliche Näherungslänge einzusetzen. Es ergibt sich somit als wirksame Gegeninduktivität zwischen Einzel- und Doppelleitung das Produkt $m_D \cdot l'$, in welchem die Länge

$$\left.\begin{aligned} l' &= l \quad \text{bei } l < l_s \\ l' &= l_s \quad \text{bei } l > l_s \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad (9).$$

Eine Freiheit sämtlicher Leitungen von störenden Querspannungen wäre dann vorhanden, wenn — bei konstantem Abstand und konstantem Strom $\Im$ — die Näherungslänge mit der doppelten Störungslänge (Grundlänge) oder einem Mehrfachen der Grundlänge zusammenfiele. Praktisch wird ein solcher Fall niemals vorkommen; bei einer Beeinflussung durch eine Starkstromanlage wird eine Linie mit normalem „5-km-Schutz“ (Störungslänge $l_s = 40$ km) kaum geringere

$Gspg_q$ aufweisen als eine Linie ohne Kreuzungen. Es besteht jedoch die Möglichkeit, im Rahmen des normalen 5-km-Schutzes auf Näherungsstrecken ein engeres Kreuzungsverfahren anzuwenden. Der Kreuzungsabschnitt läßt sich ohne Störungen der inneren Entkopplung auf 1 km sowie auch auf 200 m verkürzen. Die in Gl. (9) einzusetzenden Werte für l_s betragen dann 8 bzw. 1,6 km. Eine noch weitere Verkürzung des Kreuzungsabschnitts ist nicht möglich. Mit Rücksicht auf die Wahrung der inneren Entkopplung müßte die Abschnittslänge $\frac{200}{5} = 40$ m betragen; diese ist bei dem allgemein üblichen Abstand zweier Stangen von 50 m ohne vollkommenen Umbau einer Linie nicht auszuführen. Auch bei einer neuen Linie wird — abgesehen von betrieblichen und wirtschaftlichen Gründen — ein 40-m-Schutz deshalb nicht in Frage kommen können, weil es mit der zunehmenden Zahl der Isolatoren (bei jeder Kreuzung 2 Isolatoren je Zweig) nicht möglich sein wird, die Erdunsymmetrie u_e unter dem zulässigen Maß zu halten. Als schwachstromseitige Maßnahme kann, falls der Abstand zwischen beiden Anlagen nicht zu vergrößern ist, Störungsverminderung dann nur durch Verkabelung erzielt werden, bei der übrigens die innere Entkopplung der Adern durch verschiedene Schlaglänge der Adernpaare bewirkt wird.

Es bleibt noch zu untersuchen, wie sich bei gegebenem u_e, gegebenem l und l_s die Beträge von $Gspg_l$ und $Gspg_q$ mit dem Abstand ändern. Hieraus läßt sich beurteilen, ob bei einem bestimmten Abstand die Verminderung der einen oder der anderen Größe wichtiger ist. Der nachstehenden Tabelle sind folgende Werte zugrunde gelegt: $u_e = 1\,\%$, $l = 4$ km, $l_s = 1{,}6$ km (200-m-Kreuzungsschutz), wirksamer Strom $\Im = 0{,}7$ A der Frequenz 800 Hz (s. hierzu S. 39). Die Werte für m_E und m_D sind den Kurven der Abb. 6 und 7 entnommen.

Die Tabelle zeigt, daß bei kleinem Abstand der Einfluß der Querunsymmetrie, bei großem derjenige der Längsunsymmetrie überwiegt. Erst bei rd. 300 m Abstand wird bei den angenommenen Verhältnissen der in den Directives für zulässig erachtete Wert von 5 mV erreicht. In Verbindung mit einem Wellensauger auf der Starkstromseite, der die Fernsprechstörwirkung im Verhältnis 10:1 vermindert, wäre die Näherung bis zu einem Abstand von 20 m zulässig; ein solcher Abstand tritt z. B. auf, wenn eine Städtebahn

oder die Außenlinie einer Straßenbahn und die Fernsprechlinie auf den verschiedenen Seiten einer Landstraße verlaufen. — Bei noch engeren Abständen, wie sie recht häufig vorkommen, würde bei den angenommenen Verhältnissen nur Umlegung oder Verkabelung in Frage kommen können.

Tabelle 5.

Abstand m	$Gspg_l$ mV	$Gspg_q$ mV	$Gspg_D$ mV
2	38,4	292	330
5	29,6	118	148
10	24,7	61,7	86,4
20	19,6	30,4	50,0
50	13,5	11,2	33,7
100	9,5	4,5	14,0
200	5,6	1,8	7,4
500	1,4	0,4	1,8

Ein anderes Anwendungsbeispiel der in diesem Kapitel gegebenen Beziehungen stellt die als Anlage 4 beigefügte Untersuchung des Verfassers über den kompensierenden Einfluß geerdeter Drähte dar; die Rechnung konnte gelegentlich von Messungen an der Strecke Berlin—Tegel—Velten experimentell nachgeprüft werden. Das Ergebnis hat der Berechnung insofern entsprochen, als durch das Einschalten des Kompensationsdrahts die Geräuschspannungen in einem Teil der Leitungen gesenkt, in einem anderen gesteigert worden sind.

Viertes Kapitel.

Messung der Fernsprechstörwirkung von Gleichrichterbahnen.

A. Die Untersuchung des Stromes $\mathfrak{J}_0$.

Bei der Bestimmung der Fernsprechstörwirkung einer induktiv störenden Starkstromanlage ist es die erste Aufgabe, die Komponenten des störenden Wechselstroms $\mathfrak{J}_0$ nach Frequenz und Betrag harmonisch zu analysieren; die Untersuchung der Phasen erübrigt sich aus den eingangs angeführten Gründen. Bei Gleichrichterbahnen, bei denen die Frequenzen der störenden Wechselströme von vornherein bekannt sind (vgl. S. 3), bedarf es lediglich der Bestimmung der Beträge dieser Harmonischen.

a) Die Stromanalyse mittels Resonanz-Stromwandlers.

Der Luft-Stromwandler, dessen Sekundärseite auf Resonanz für die zu untersuchende Frequenz abgestimmt ist[34]), bietet hierzu ein einfaches Hilfsmittel. Es bezeichne (vgl. Abb. 11)

$\mathfrak{J}_x$ den Betrag des gesuchten Oberwellenstroms,
M den gegenseitigen Induktionskoeffizienten des Wandlers,
L_2 den S.I.K. seiner Sekundärwicklung,
C_v einen veränderbaren Kondensator,
r_2 den Gesamt-Wirkwiderstand des Sekundärkreises,
i_x den gemessenen Strom auf der Sekundärseite.

Erfüllt C_v die Resonanzbedingung $\omega_x^2 \cdot L_2 \cdot C_v = 1$, dann ergibt sich J_x aus der Gleichung

$$J_x = \frac{r_2 \cdot i_x}{\omega_x \cdot M} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (10).$$

Es ist also nur notwendig, den Kondensator nacheinander auf die sich aus der Resonanzbedingung ergebenden Werte einzustellen und jedesmal den Strom i abzulesen. Die vom Verfasser benutzte Anordnung besteht aus folgenden Teilen:

1. einem Luft-Stromwandler, primär belastbar mit 1000 und 2000 A maximal (Strom I_0), 2. einem Kurbelkondensator von S & H, mit drei Dekaden, max. 0,999 μF, parallel mit einem Drehkon-

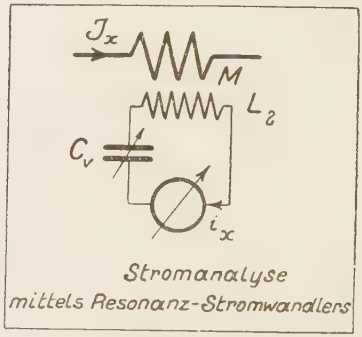


Abb. 11.

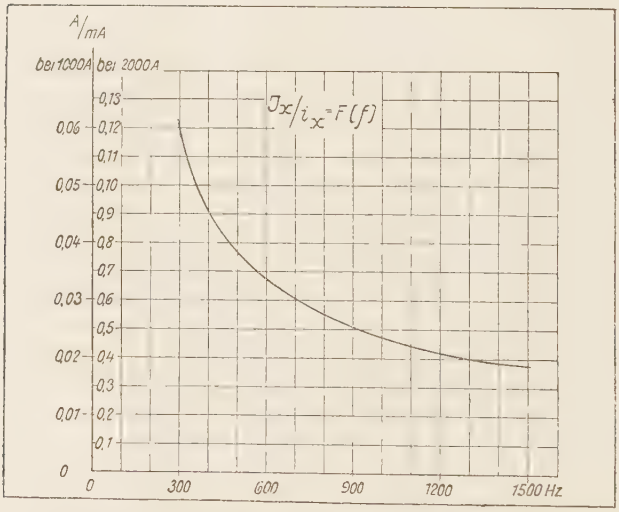


Abb. 13. Durch Versuch ermittelte Eichkurve zum Resonanz-Stromwandler.

densator von 1800 $\mu\mu$F, 3. einem Thermoelement, max. 15 mA von S & H mit rein ohmschen Vor- und Nebenwiderständen, die derart angeordnet sind, daß der Gesamtwiderstand stets der gleiche bleibt („Zusatz zum Zeiß" im Lichtbild), 4. einem Schleifengalvanometer

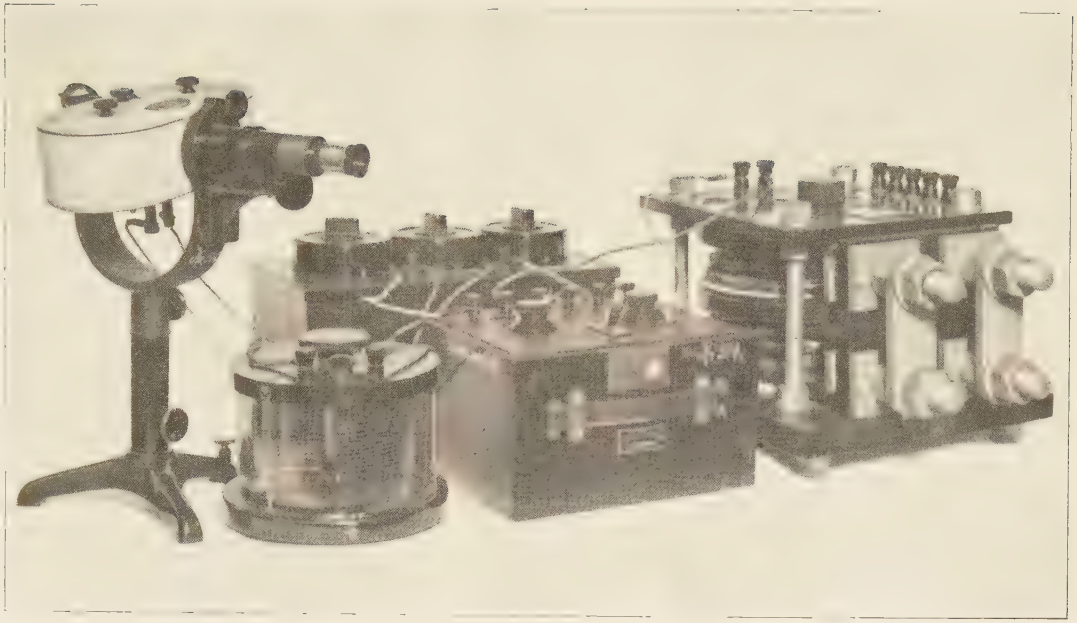


Abb. 12. Anordnung zur Stromanalyse mittels Resonanztransformators.

von C. Zeiß zur Messung der Thermospannung. — Wird in die Primärwicklung des Wandlers ein sinusförmiger Strom $\mathfrak{J}_x$ (z. B. Frankesche Maschine) geschickt, so ergibt sich folgende empirische Eichkurve $\mathfrak{J}_x/i_x = F(f)$, Abb. 13.

Bei der Bestimmung der Transformatorkonstanten waren die beiden folgenden, widerstreitenden Forderungen zu berücksichtigen: einerseits sollte die Resonanzkurve möglichst scharf sein, um ein „Sich-Durchdrücken" der nicht abgestimmten Frequenzen zu verhindern. Sonst kann nämlich besonders die nächst tiefere Frequenz,

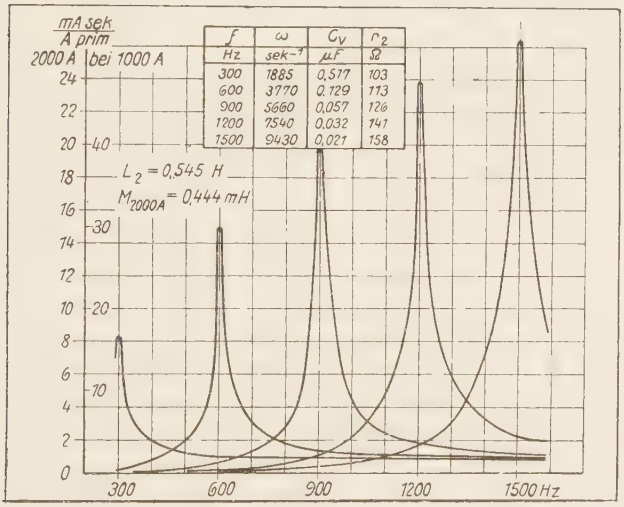


Abb. 14. Resonanzkurven zum Strom-Analysator für die Hauptstörfrequenzen des 50-periodigen Sechsphasengleichrichters.

die ja dem Betrag nach meist größer ist als die zu untersuchende, erhebliche Meßfehler verursachen. Anderseits war in Rechnung zu stellen, daß die betriebsmäßigen Schwankungen der Netzfrequenz bei sehr scharfer Resonanzkurve ein Herausrücken aus dem Resonanzmaximum und infolgedessen Fehlweisungen zur Folge haben (vgl. das auf S. 8 bei der Berechnung der Resonanz-Querkreise Gesagte). Der Einfluß des Durchdrückens ist bei der endgültigen Ausführung aus den Resonanzkurven der Abb. 14 ersichtlich. Bei Einstellung auf $f = 600$ Hz drückt sich z. B. die Frequenz 300 Hz

im Verhältnis $\frac{0{,}25}{14{,}8} = 1{,}7\,\%$ durch. Schwankungen der Netzfrequenz um $+1\,\%$ verursachen Fehler des Stroms i_x von max. $3{,}5\,\%$ Bei Dauerstrom, also konstantem Zustand der Starkstromanlage, lassen sich diese jedoch durch Einregeln des Kondensators auf Strom-Maximum beseitigen.

Die beschriebene Anordnung gestattet, an einem 50 periodigen Sechsphasengleichrichter die Analyse der Ströme 300, 600, . . . 1500 Hz in etwa 3 Minuten auszuführen. In der Anlage 5 sind die Ergebnisse zweier derartiger Analysen mitgeteilt*).

b) Oszillographieren des Stroms $\mathfrak{J}_0$.

Die im vorstehenden angegebene Stromanalyse ermöglicht eine quantitative Untersuchung der im Gleichrichter-Betriebsstrom enthaltenen Oberschwingungen. Obgleich die Meßergebnisse an sich für die Beurteilung der Fernsprechstörwirkung eine einwandfreie Grundlage bilden, wird man doch „sicherheitshalber" stets, wenn angängig, den Strom oszillographieren. Auch hierbei interessiert an Gleichrichteranlagen vom Gesamtstrom nur der überlagerte Wechselstrom $\mathfrak{J}_0$. Der Luft-Stromwandler ist ein bequemes Hilfsmittel, um den Strom $\mathfrak{J}_0$, und zwar amplitudengetreu, zu oszillographieren. Ist der induktive Widerstand der Sekundärwicklung schon bei der kleinsten im Strom $\mathfrak{J}_0$ enthaltenen Harmonischen groß gegen den ohmschen Widerstand, so wird eine an die Sekundärwicklung angeschlossene Schleife das Bild von $\mathfrak{J}_0$ amplitudengetreu zeichnen; denn die Sekundärspannung ist zwar veromegafacht (s. S. 15), doch nimmt bei der gemachten Voraussetzung auch der Scheinwiderstand der Sekundärseite proportional mit der Frequenz zu, so daß sich beide Wirkungen aufheben. In den Oszillogrammen der Anlage 5 sind die mittleren Kurven in dieser Weise aufgenommen.

---

*) Neuestens hat Geyger ein Verfahren zur Messung der Wechselstromkomponente von Gleichrichterströmen nach der Kompensationsmethode veröffentlicht[35]). Mit der Anordnung wird zunächst nur die Grundwelle des überlagerten Wechselstroms gemessen. Hierzu bedarf es eines mit einem Synchronmotor starr gekuppelten Hilfsgenerators, der die Kompensations-Hilfsspannung erzeugt. Zum Messen der höheren Harmonischen sind entweder weitere Generatoren oder ruhende Frequenzwandler mit Gleichstrom-Vormagnetisierung erforderlich.

Die quadratische Summierung der Beträge der einzelnen Harmonischen, die durch die Stromanalyse mittels Resonanztransformators — oder auch durch harmonische Analyse der oszillographierten Stromkurve — ermittelt sind, gestattet die Bestimmung der Stärke des Gesamtwechselstroms $\mathfrak{J}_0$ und mit Kenntnis des Gleichstroms I_0 die der Welligkeit sowie der Größen, die die Güte einer Gleichrichteranlage vom energetischen Standpunkt aus kennzeichnen.

c) Berechnung des Störstroms $\mathfrak{J}_{st}$.

Um die Zahlen zur Berechnung von Fernsprechstörwirkungswerten verwenden zu können, müssen zunächst die Beziehungen zwischen den Oberwellenströmen oder allgemeiner zwischen den Strömen des akustisch wahrnehmbaren Frequenzbandes und der Fernsprechstörwirkung dargelegt werden. Es sind dabei zwei Umstände zu berücksichtigen[36]: erstens die Energieübertragung vom Starkstrom- in das Schwachstromsystem, die nach den Ausführungen des II. Kapitels durch die Gegeninduktivität gekennzeichnet ist. Um einfache Verhältnisse zu bekommen, die sich auch meßtechnisch verwirklichen lassen, wird entsprechend dem Punkt a) unter B (S. 15) die Gegeninduktivität in erster Annäherung als konstant unterstellt, so daß die in der Schwachstromleitung induzierte Spannung $\mathfrak{E}$ in ihren Komponenten gegenüber denen des Stroms $\mathfrak{J}_0$ veromegafacht erscheint. Zweitens ist die physiologische Wirkung des menschlichen Ohrs auf gleich starke Töne verschiedener Frequenz in einem Fernhörer zu berücksichtigen. Nach den Untersuchungen des amerikanischen Unterausschusses für Wellenformnormen des Normenausschusses, über die Osborne berichtet hat[37]), existiert eine ganz bestimmte „Störempfindlichkeitskurve des Ohrs", die in der Abb. 15 mit o bezeichnet ist (s. S. 38). Die Berücksichtigung beider Momente zugleich — Veromegafachung und Ohrstörempfindlichkeit — ergibt eine Kurve, die im folgenden „Charakteristik" $c = F(f)$ genannt werde; in Abb. 15 ist sie mit c bezeichnet*).

Die Charakteristik ist die Brücke zwischen den bestimmten Stromwerten und der Fernsprechstörwirkung. Die quadratische Summe aller

*) Die von Osborne veröffentlichten Kurven reichen nur bis 1500 Hz. Das Stück von 1500...2900 Hz stammt aus gemeinsamen neuen Messungen der American Brown Boveri El. Corp. und der Bell-Gesellschaft. Der Verfasser ist der Firma Brown, Boveri & Cie., Baden (Schweiz) für die Überlassung der vollständigen Kurve zu Dank verpflichtet.

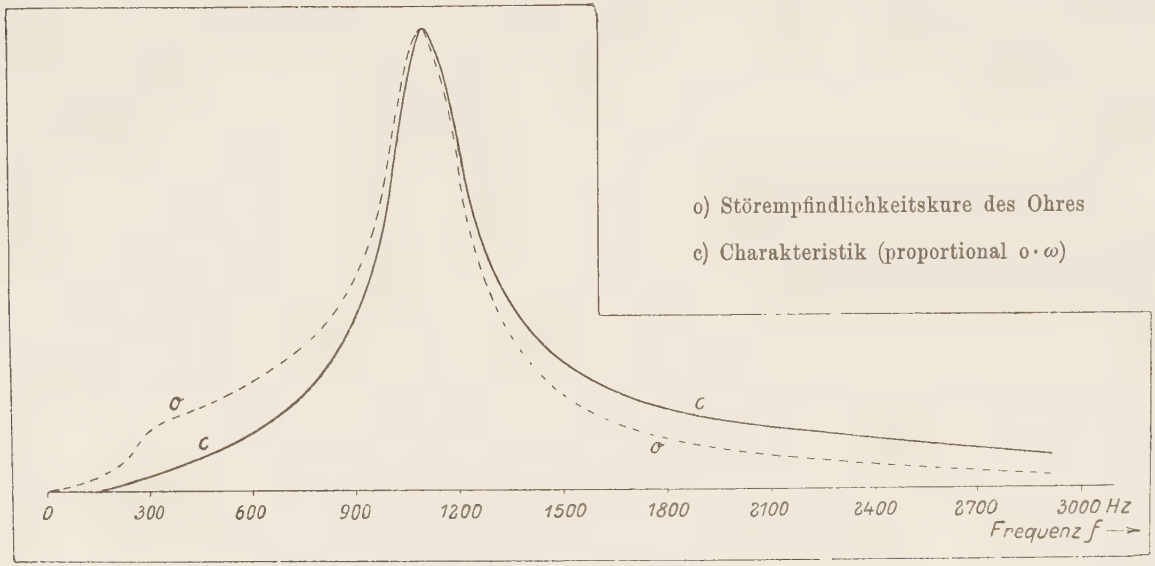

o) Störempfindlichkeitskure des Ohres
c) Charakteristik (proportional o · ω)
o
c
c
o
0
300
600
900
1200
1500
1800
2100
2400
2700
3000 Hz
Frequenz f →

Abb. 15.

Produkte: Strombetrag mal zugeordnetem Wert der Charakteristik liefert die Fernsprechstörwirkung Q einer Starkstromanlage:

$$Q = \sqrt{\sum (\mathfrak{J}_x \cdot c_x)^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (11)$$

Eine andere Starkstromanlage mit ganz anderen Frequenzen und Beträgen der Wechselströme ist offenbar, sofern sie nur den gleichen Fernsprechstörwirkungswert Q besitzt, fernsprechtechnisch der ersten vollkommen gleichwertig. Auch eine Anlage mit nur einem einzigen, sinusförmigen Strom $\mathfrak{J}_y$ verursacht, wenn das Produkt $\mathfrak{J}_y \cdot c_y = Q$ ist, die nämliche Fernsprechstörwirkung. Man kann sich schließlich eine Anlage vorstellen, in der ein und nur ein sinusförmiger Strom einer ganz bestimmten vorgegebenen Frequenz — z. B. 800 Hz — fließt und welche wiederum die durch Q gekennzeichnete Fernsprechstörwirkung verursacht. Da der Frequenz 800 Hz der Wert c_{800} zugeordnet ist, errechnet sich der Strom $\mathfrak{J}_{800}$ aus

$$\mathfrak{J}_{800} = \frac{Q}{c_{800}} \quad \text{und unter Berücksichtigung von Gl. (11)}$$

$$\mathfrak{J}_{800} = \frac{1}{c_{800}} \sqrt{\sum (\mathfrak{J}_x \cdot c_x)^2} = \sqrt{\sum \left(\mathfrak{J}_x \cdot \frac{c_x}{c_{800}} \right)^2} \quad . \quad . \quad (12)$$

S & H haben nun vorgeschlagen, die Fernsprechstörwirkung einer Starkstromanlage nicht durch eine Zahl Q, sondern durch den „Störstrom“ $\mathfrak{J}_{st}$ zu kennzeichnen[38]), der folgendermaßen definiert werden kann:

Der Störstrom ist derjenige Strom der Frequenz 800 Hz, der die gleiche Fernsprechstörung verursacht wie die Summe der in der Starkstromanlage tatsächlich fließenden Wechselströme.

Der Störstrom $\mathfrak{J}_{st}$ berechnet sich also aus den analysierten Stromharmonischen nach Gl. (12); in der Anlage 5 ist eine derartige Berechnung der Analysenwerte durchgeführt.

d) Verfahren zur Messung des Störstroms.

Die Frage liegt nahe, ob man den Störstrom nicht unmittelbar aus einer einzigen Messung erhalten kann. Es ist dies möglich, und zwar auf zwei verschiedenen Wegen. Beide Verfahren müssen die Gesamtheit des Hörbarkeitsbereiches, die Veromegafachung und die Störempfindlichkeit des Ohrs berücksichtigen. Das eine, von S & H angegebene Verfahren tut dies in folgender Weise: die auf der Sekundärseite eines Luftstromwandlers veromegafachte Spannung wird an einen

Fernhörer gelegt und erzeugt in diesem einen Klangeindruck (Geräuschspannung Gspg in V), dessen Stärke mittels des Ohrs durch Vergleich mit der Stärke eines geeichten, regelbaren Normaltons der Frequenz 800 Hz bestimmt wird. Das Lichtbild der Abb. 16 zeigt die vom Verfasser benutzte Anordnung: Luftstromwandler und „Geräuschspannungsmesser" (rechts neben dem Wandler) mit seinen Zusatzeinrichtungen, nämlich Stimmgabelsummer (rechts vorn) mit Sammler zur Erzeugung des Normaltons, geschirmtem Ringübertrager (rechts hinten) zum Symmetrieren gegen Erde, Stromreiniger (vorn Mitte) zur Unterdrückung der höheren Frequenzen, Regelwiderstand, Thermo-Milliamperemeter, Hörer. Die ermittelte Geräuschspannung, geteilt durch 5000·M (M die bekannte Gegeninduktivität des Stromwandlers) ergibt unmittelbar den Störstrom

$$\Im_{st} = \frac{Gspg}{5000 \cdot M} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (13)$$

Ein Punkt verdient bei dem Verfahren besonderer Beachtung. Die rechnerische Behandlung ordnet jeder Frequenz x — unabhängig vom Betrag $\Im_x$ des Stroms dieser Frequenz — einen Wert der Charakteristik c_x zu und addiert alle Einzelwerte quadratisch. Ob das Ohr dies bei einem zusammengesetzten Klang ebenso macht, ist zum mindesten zweifelhaft. Daß kleine Beträge an sich stark störender Frequenzen (900, 1200 Hz) durch den großen Betrag der tiefen Hauptstörfrequenz (meist 300 Hz) verdeckt werden können, ist sehr wahrscheinlich. Hieraus erklären sich zahlenmäßige Unterschiede des „Störstroms nach S & H" vom „Störstrom aus Analyse". Doch sind nach dem bisher vorliegenden Material die Unterschiede niemals Größenordnungen, sondern höchstens Prozente, also Differenzen, die man bei derartigen Messungen zunächst wohl in Kauf nehmen kann. — In der Anlage 5 ist auch eine Versuchsreihe des Störstroms nach S & H angegeben.

Das zweite Verfahren ist frei von solchen Unterschieden und muß grundsätzlich das gleiche wie die Analyse liefern. Es beruht auf dem von Osborne angegebenen Gerät, welches Veromegafachung und Störempfindlichkeit, also die Charakteristik c, durch eine Siebkette nachbildet, deren Leitfähigkeit in Abhängigkeit von der Frequenz gleich der Charakteristik ist. Das Verhältnis des hinter der Siebkette gemessenen Stroms zur Eingangsspannung (μ A/V) gilt als ein Maß für die Fernsprechstörwirkung und wird mit Telephone Interference Factor, „TIF" bezeichnet. Ursprünglich war das Gerät in den USA für Spannungs-

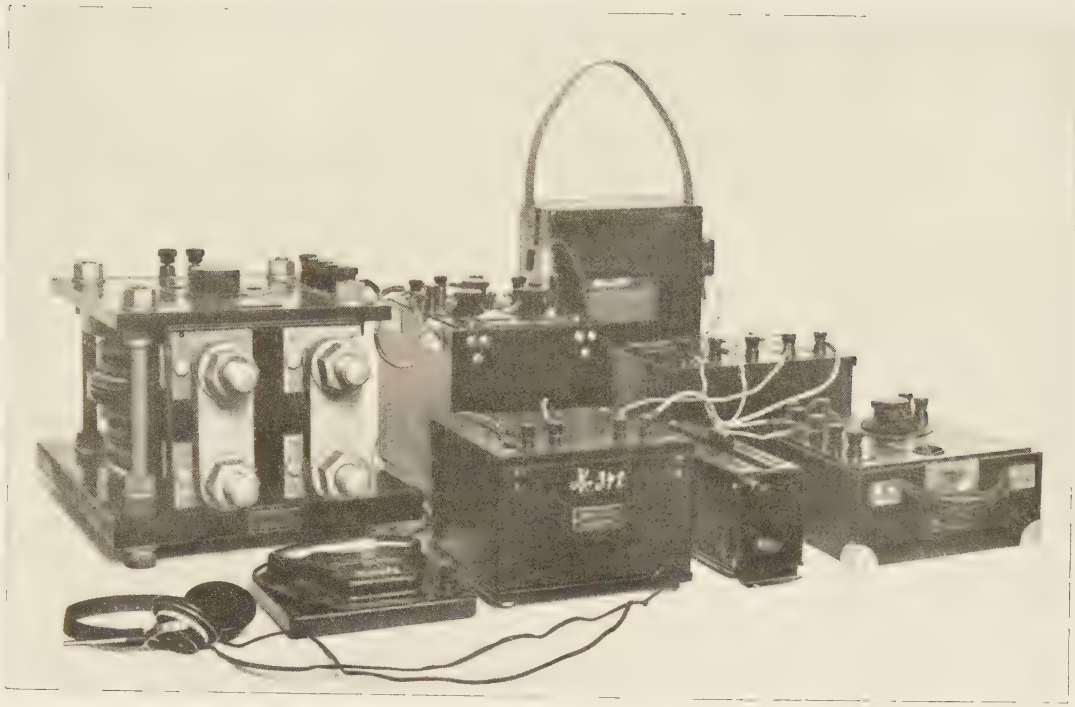


Abb. 16. Anordnung zum Messen des Störstroms nach S & H.

untersuchungen entwickelt worden (hiervon wird im zweiten Abschnitt noch die Rede sein). In Deutschland wurde es zu Stromuntersuchungen, zur Bestimmung eines „Strom-TIF", verwendet, wobei in den Pfad des zu untersuchenden Stroms ein rein ohmscher Widerstand eingebaut und der an diesem auftretende Spannungsabfall als Eingangsspannung der Siebkette verwendet wurde. Diese Anordnung war technisch unbefriedigend. Der im Stromkreis liegende Widerstand war sehr unhandlich, verbrauchte erhebliche Energien und war dauernd in Gefahr, bei den unvermeidlichen Überlastungen des Bahnbetriebs durchzubrennen (dies geschah auch einmal). Die Methode ist überholt durch die von

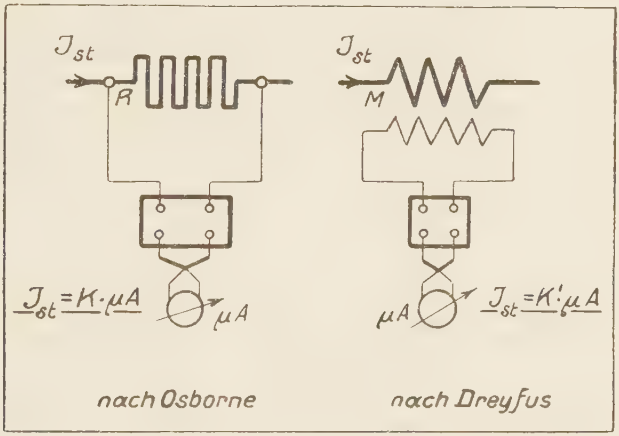


Abb. 17.

Dreyfus angegebene Anordnung zur Untersuchung der Fernsprechstörwirkung von Strömen[39]). Dreyfus ersetzt Widerstand und Siebkette durch einen Lufttransformator und eine andere Siebkette, die zusammen als Durchlässigkeitskurve wieder die Charakteristik c ergeben. In der Abb. 17 sind die beiden Anordnungen nebeneinander gestellt. S & H hat das von Dreyfus in allen Einzelheiten veröffentlichte und von ihm nicht geschützte Gerät mit einigen Abänderungen nachgebaut; eines dieser Stücke, im Besitz des Telegraphentechnischen Reichsamts, hat dem Verfasser bei seinen Messungen zur Verfügung gestanden (s. Lichtbild Abb. 18). Der Lufttransformator ist — bis auf eine andere Sekundärspule — der gleiche wie der von Abb. 12, auch Thermoelement und Schleifengalvanometer sind die aus

dieser Abbildung bekannten Ausführungen; lediglich die Siebkette ist neu in dem Lichtbild.

Was für eine Größe mißt diese Anordnung? Nach Dreyfus ergibt sie einen Strom-TIF entsprechend der Beziehung

$$\text{Strom-TIF} = \frac{C \cdot [\mu A]}{\mathfrak{J}_0} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (14)$$

(C = Apparatkonstante; $\mathfrak{J}_0$ = Betriebsstrom, bei Gleichrichteranlagen = I_0, bei Wechselstromanlagen der Effektivwert des Grundschwingungsstroms), wobei dieser TIF zahlenmäßig der gleiche ist wie der, den man in der Anordnung nach Osborne erhält.

Es ist jedoch ein Leichtes, bei beiden Anordnungen aus den μA hinter der Siebkette einen Störstrom zu bestimmen, der in beiden Fällen den gleichen Zahlenwert geben muß. Bei der Anordnung nach Osborne sind die μA mit einer Konstante K (in der R enthalten ist), bei derjenigen nach Dreyfus mit einer anderen K′ (in der M enthalten ist) zu multiplizieren, um unmittelbar den Störstrom zu erhalten (vgl. Abb. 17). Es leuchtet ein, daß die so bestimmten Störströme „nach Osborne“ und „nach Dreyfus“ mit dem aus den analysierten Strömen berechneten Störstrom genau übereinstimmen müssen.

Es besteht also eine fünffache, oder wenn von der veralteten Anordnung zur Stromuntersuchung nach Osborne abgesehen wird, eine vierfache Möglichkeit, den Störstrom $\mathfrak{J}_{st}$ zu ermitteln: aus der Stromanalyse mittels Resonanztransformators und Berechnung des Störstroms nach Gl. (12), aus dem Oszillogramm des Stroms, das harmonisch analysiert und nach Gl. (12) ausgewertet wird, aus der unmittelbaren Bestimmung nach Dreyfus und schließlich aus der unmittelbaren Bestimmung nach S & H mittels Geräuschspannungsmessers. Die drei erstgenannten Verfahren liefern grundsätzlich den gleichen Wert, das vierte Verfahren aus den oben erwähnten Gründen einen anderen und vielleicht den maßgebenden; denn es ist letzten Endes auch das menschliche Ohr, das in den beeinflußten Fernsprechleitungen die Geräusche wahrnimmt.

e) Stromgüte.

Der Störstrom kennzeichnet definitionsgemäß die Fernsprechstörwirkung einer Starkstromanlage. Über das Verhältnis des Störstroms

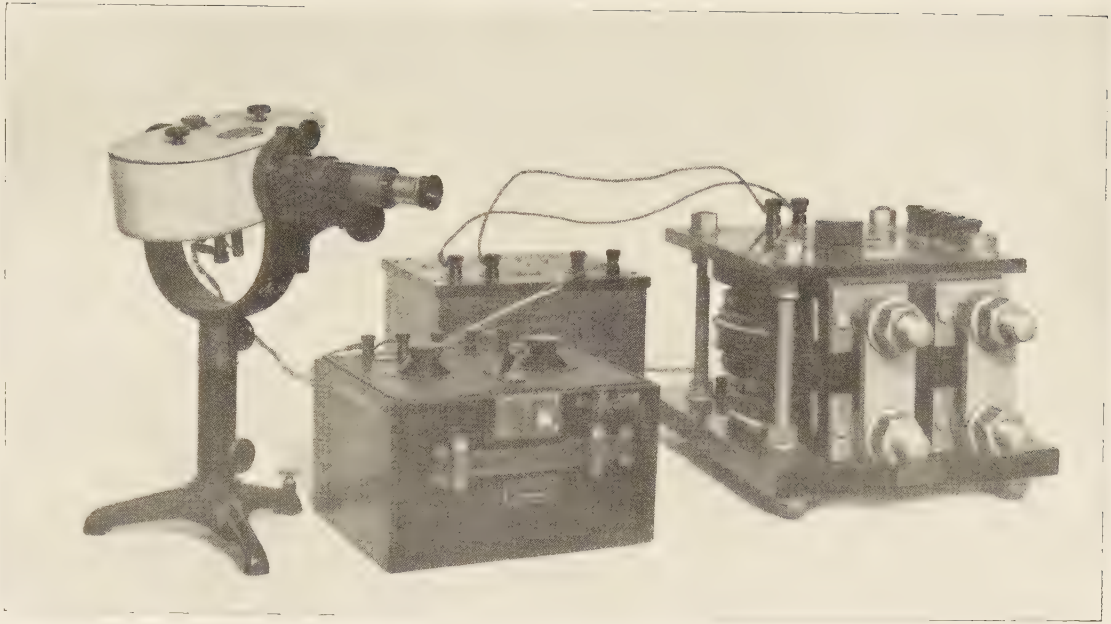


Abb. 18. Anordnung zum Messen des Störstroms nach Dreyfus.

zum Betriebsstrom, also bei Gleichrichteranlagen zum Gleichstrom I_0, sagt er nichts aus. Dem Schwachstromingenieur ist es gleichgültig, ob eine Gleichrichterbahn 100 oder 1000 A Gleichstrom führt; wenn ihr Störstrom ungünstigstenfalls 1,0 A beträgt, so ist ihm dies die Zahl, nach der er die Abstände zwischen beiden Anlagen oder schwachstromseitige Maßnahmen berechnet. Für den Starkstromkonstrukteur kann das Verhältnis des Störstroms zum Betriebsstrom nicht gleichgültig sein; für ihn ist eine Maschine, eine Anlage hinsichtlich ihrer Fernsprechstörwirkung umso besser, je kleiner das Verhältnis des Störstroms zum Betriebsstrom ist. Historisch liegen die Dinge so, daß zuerst ein Maß für die „relative Fernsprechstörwirkung", eben der TIF, geschaffen wurde, bei dem in Gl. (14) $\mathfrak{I}_0$ im Nenner steht. Aber dieses Maß ist willkürlich und durch die zufälligen Daten der ersten Siebkette bestimmt. S & H haben später, als sie ihren Geräuschspannungsmesser zur Bestimmung der Fernsprechstörwirkung einer Starkstromanlage benutzten, einen „Störfaktor" definiert als das Verhältnis der mV Geräuschspannung zur Grundwelle der Eingangsspannung V am Geräuschspannungsmesser. Die Einzelheiten dieses Verfahrens hat Jäger näher beschrieben und mit ihm an Einphasenbahnanlagen erhaltene Versuchswerte mitgeteilt[36]). Da S & H das von ihnen neuestens hergestellte Gerät nach Dreyfus Störfaktormesser nennen, also offenbar den TIF mit Störfaktor übersetzen wollen (der aber ein anderer ist als der in dem Jägerschen Aufsatz beschriebene), so besteht gegenwärtig auch bei den Fachingenieuren eine Verwirrung in den Maßen für die relative Störwirkung. Es soll daher vorgeschlagen werden, für die relative Fernsprechstörwirkung des Stroms einer Starkstromanlage den Begriff „Stromgüte" einzuführen und die Stromgüte zu definieren als

$$\text{Stromgüte } g_{\mathfrak{I}} = \frac{\text{Störstrom } \mathfrak{I}_{st}}{\text{Betriebsstrom } \mathfrak{I}_0} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (15).$$

Im ersten Kapitel ist darauf hingewiesen worden, daß sich für den idealen Gleichrichter zwar das Verhältnis der Spannungsbeträge der Harmonischen zur Gleichspannung, aber nicht das Verhältnis der Beträge der Stromharmonischen zum Gleichstrom angeben läßt. Störstrom und Stromgüte können demnach, wenn man alle starkstromseitig möglichen Betriebszustände erfassen will, erschöpfend nur in der Form von Kurvenscharen angegeben werden. Variable sind im Betrieb die Gleichstrombelastung (Anzahl der Wagen) und die Netzinduktivität (Stellung der Fahrzeuge). Die Aufnahme derartiger Kurvenscharen an

wirklichen Gleichrichtern kann aber auch im Prüffeld meßtechnisch keine Schwierigkeiten machen. Ermittelt man den Störstrom in Abhängigkeit von der Gleichstrombelastung unter Einschaltung verschiedener Induktivitäten, so wird sich ein Schaubild zeichnen lassen, das einen vollständigen Einblick in den wirklichen Verlauf des Störstroms bzw. der Stromgüte bei allen in Frage kommenden Netzbelastungen ergibt. Derartige Schaubilder herzustellen, wird eine Aufgabe der Gleichrichter bauenden Firmen sein.

Die Abb. 19 zeigt Kurven des Störmstroms $\mathfrak{J}_{st} = F(I_0)$, die der Verfasser an einer Gleichrichterbahn während des regelmäßigen

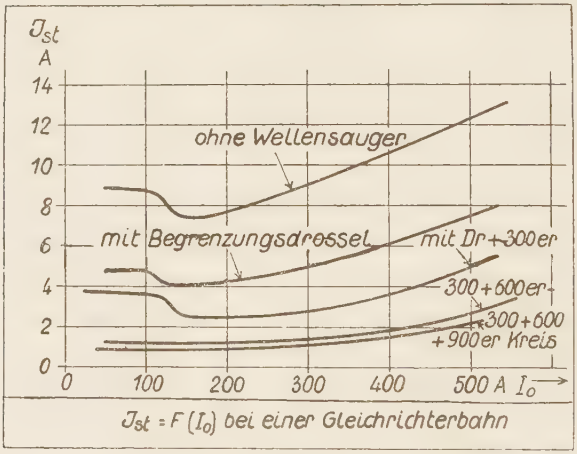


Abb. 19.

Fahrbetriebs gemessen hat. Der Einfluß der Induktivität (Wagenstellungen) war verhältnismäßig gering, so daß durch die Versuchspunkte mit guter Annäherung Mittelwertkurven gelegt werden konnten, die nur den Einfluß von I_0 berücksichtigen. Die Schwankungen der Kurven bei geringen Belastungen rühren von den Oberschwingungen her, die eine bei kleiner Last laufende Zünddynamo verursacht.

B. Die Untersuchung der Spannung $\mathfrak{E}_0$.

a) Störspannung, Spannungsgüte und die Verfahren zur Messung beider Größen.

Im ersten Kapitel ist auf S. 3ff. auseinandergesetzt worden, daß der Widerstand der Starkstromanlage für die Oberschwingungen im

allgemeinen als rein induktiv angenommen werden kann. Für jede Harmonische J_x des mehrwelligen Wechselstroms J_0 gilt also die Gleichung

$$J_x = \frac{\mathfrak{E}_x}{\omega_x \cdot L}$$

(L die Gesamt-Induktivität der Strecke + der Induktivität der Fahrmotoren). Der Gesamt-Wechselstrom J_0 ist in diesem Fall gegenüber der Spannung $\mathfrak{E}_0$ „entomegafacht".

Anderseits sind nach den Ausführungen im dritten Kapitel die in einer Fernsprechleitung induzierten Spannungen — Längs- und Querspannungen — und infolgedessen auch die Geräuschspannungen gegenüber einem induzierenden Strom veromegafacht. Bei einem Strom $\mathfrak{J}_x$ ist nach Gl. (6) die Geräuschspannung in einer Doppelleitung

$$Gspg_{D_x} = \omega_x \cdot (u_e/4 \cdot m_E \cdot l + m_D \cdot l') \cdot \mathfrak{J}_x \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (6);$$

in Verbindung mit der vorhergehenden Gleichung folgt damit für die Geräuschspannung der Frequenz x

$$Gspg_{D_x} = \frac{(u_e/4 \cdot m_E \cdot l + m_D \cdot l') \cdot \mathfrak{E}_x}{L} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (16)$$

Die Gleichung zeigt, daß die Geräuschspannung in einer Doppelleitung — übrigens auch diejenige in einer Einzelleitung — ein amplitudengetreues, von der Frequenz unabhängiges Bild der Gleichrichter-Wechselspannung ist. Hierauf haben Zastrow und Benda[7]) bereits hingewiesen.

Ersetzt man den Strom der Frequenz x durch die Summe aller wirksamen Ströme und diese wiederum durch den äquivalenten Störstrom $\mathfrak{J}_{st}$, so läßt sich die von der Gesamtheit aller Oberschwingungen infolge Induktion verursachte Störwirkung durch die Gleichung

$$Gspg_D = \frac{(u_e/4 \cdot m_E \cdot l + m_D \cdot l') \cdot \mathfrak{E}_{st}}{L} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (17)$$

zum Ausdruck bringen, in der die „Störspannung" $\mathfrak{E}_{st}$ aus dem Störstrom durch die Gleichung

$$\mathfrak{J}_{st} = \frac{\mathfrak{E}_{st}}{5000 \cdot L}$$

definiert ist. Die Störspannung ist aber auch ohne Benutzung des Stroms unmittelbar aus den Spannungsharmonischen zu definieren. Dabei ist zu beachten, daß die Reduktion einer Spannung $\mathfrak{E}_x$ der

Frequenz x auf die Bezugsfrequenz 800 Hz nicht im Verhältnis $\frac{c_x}{c_{800}}$, sondern im Verhältnis $\frac{o_x}{o_{800}}$ zu erfolgen hat, weil nur die Störempfindlichkeit des Ohrs zu berücksichtigen ist. Auch hierauf haben Zastrow und Benda aufmerksam gemacht. — Bei Anlagen, die durch die Wirkungen ihrer elektromagnetischen Felder Störungen verursachen, ergibt sich hiernach für die Störspannung die Definitionsgleichung:

$$\mathfrak{E}_{st} = \sqrt{\sum \left(\mathfrak{E}_x \cdot \frac{o_x}{o_{800}}\right)^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (18)$$

in Worten: Die Störspannung ist diejenige Spannung der Frequenz 800 Hz, die dieselbe Fernsprechstörwirkung verursacht wie die Summe der tatsächlich wirksamen Wechselspannungen.

Anmerkung. Anlagen, die durch ihre elektrischen Felder Fernsprechstörungen verursachen, haben andersgeartete Verhältnisse. Hier ist die influenzierte Spannung ein formgetreues Bild der störenden Spannung, der Ladestrom hingegen ist veromegafacht. Da die amerikanische Siebkette ursprünglich zur Spannungsuntersuchung von Maschinen entwickelt worden ist, die auf kapazitiv störende Systeme (Drehstromanlagen) arbeiten, hat sie als Leitwertkurve die Charakteristik c und nicht die Störempfindlichkeitskurve des Ohrs o erhalten.

Nach Gl. (17) wird die Geräuschspannung unmittelbar durch die Störspannung und, abgesehen von der Erdunsymmetrie und den Längen, nur noch durch die Induktionskoeffizienten bestimmt. Hat die Näherung und die gespeiste Strecke gleiche Länge (kleiner als die Störungslänge) und vernachlässigt man in erster Annäherung die Induktivität der Fahrmotoren, so ergibt sich die zunächst überraschende Tatsache, daß die Größe der Störungen von der Stellung des Fahrzeugs unabhängig ist.

Neben der Störspannung wird sich, analog zur Stromgüte, eine Spannungsgüte (Äquivalentspannung in $^0/_0$ der Betriebsspannung) definieren lassen. Für den p-anodigen, idealen 50-Per-Gleichrichter läßt sie sich an Hand der Tabelle 1 (S. 3) und der Ohrkurve o der Abb. 15 (S. 38) ohne weiteres genau berechnen. Sie betragen für

p =	3	6	12	Anoden
	2,68	1,79	0,85	$^0/_0$.

Beim wirklichen Gleichrichter liegen die Zahlen höher und steigen mit

zunehmender Gleichstrombelastung. Für den belasteten Sechsphasengleichrichter haben Marti und Winograd[5]) die Ergebnisse einer Spannungsanalyse mitgeteilt, aus der sich eine Spannungsgüte (bei $f = 60$ Hz) von $3{,}52\,\%$ errechnet. Sonst liegt, auch für andere Anodenzahlen, noch kein Zahlenmaterial vor. Doch ist für die Störungsberechnung nach Gl. (17) die Kenntnis solcher Zahlen und der Grenzen, innerhalb deren sie bei den verschiedenen Betriebszuständen schwanken, unerläßlich.

Nach dem, was im ersten Abschnitt bei der Untersuchung des Stroms angegeben ist, kann es keine Schwierigkeiten machen, die Störspannung (und die Spannungsgüte) unmittelbar zu messen. Die Messung hat das hörbare Frequenzspektrum zu umfassen und jeder Frequenz x die Wertigkeit o_x zuzuordnen. Dies könnte „nach S & H“ mit einem Geräuschspannungsmesser geschehen, der ohmisch, also mittels eines Potentiometers, zwischen Plus und Minus geschaltet würde. Zweitens ließe sich eine Anordnung verwenden, die eine — zunächst noch nicht gebaute — Siebkette mit der Störempfindlichkeitskurve des Ohrs o als Leitwertkurve benutzt und welche entweder unmittelbar oder über ein Potentiometer zwischen Plus und Minus anzuschließen wäre. Man kann aber auch die bereits vorhandenen Anordnungen nach Osborne und nach Dreyfus verwenden, wenn man sie entomegafacht. Bei der Anordnung nach Dreyfus ließe sich dies durch eine große, mit der Primärwicklung des Wandlers in Reihe geschaltete Induktivität erreichen. Die Primärwicklung müßte hierbei allerdings durch eine dünndrähtige mit der bei Strommessungen wirksamen AW-Zahl ersetzt werden. — Nicht möglich ist es, die Siebkette nach Dreyfus allein (oder in Verbindung mit einem Potentiometer) zu verwenden. Es ist nicht so, daß bei der Störstrommessung nach Dreyfus der Wandler das ω liefert und die Siebkette die o-Kurve nachbildet; die ganze Anordnung ist vielmehr eine einzige, die c-Kurve nachbildende Schaltung, weil die Sekundärinduktivität des Wandlers zugleich Eingangsinduktivität der Siebkette ist. — Bei der Anordnung nach Osborne ließe sich der Faktor ω dadurch ausscheiden, daß die Eingangsklemmen der Siebkette an eine Kapazität gelegt werden, die mit einem ohmschen Widerstand in Reihe geschaltet ist; diese Reihenschaltung wäre so zu dimensionieren, daß die Amplituden der sie durchfließenden Stromharmonischen allein durch den ohmschen Widerstand bestimmt würden. In der Abb. 20 (S. 48) sind diese

vier möglichen Ausführungsformen nebeneinander gestellt. Um zu verhindern, daß die Anordnungen bei der Messung eine gefährliche Spannung gegen Erde annehmen, kann die Gleichspannung des nicht geerdeten Pols der Anlage in allen Fällen durch Blockierungskondensatoren abgeriegelt werden; diese Kondensatoren müssen eine so große Kapazität besitzen, daß ihr Widerstand auch bei der kleinsten zu berücksichtigenden Frequenz klein gegen die mit ihnen in Reihe liegenden ist. In der Abb. 20 sind solche Kondensatoren in allen vier Fällen angedeutet. — Die Anordnung a) berücksichtigt wieder die wahren physiologischen Verhältnisse des Ohrs, die Anordnungen b)—d) müßten die gleichen (und mit der Berechnung aus einer Analyse übereinstimmenden) Werte liefern.

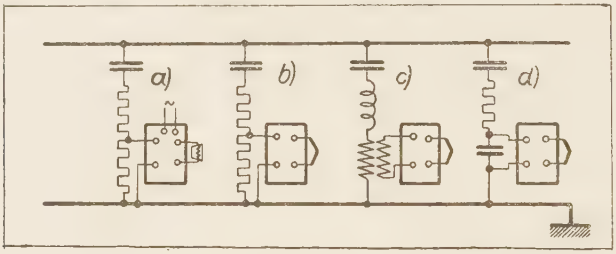


Abb. 20. Störspannungsmessung
a) „nach S & H“, b) mit einer o-Siebkette, c) „nach Dreyfus“, d) „nach Osborne“.

In der Anlage 5 sind Ergebnisse mitgeteilt, die der Verfasser mit der Anordnung a) bei konstanter Belastung, jedoch verschiedenen Schaltungen des Wellensaugers gemessen hat.

b) Möglichkeit der Garantie bei Wellensaugern.

Wenn Erfahrungen vorliegen, innerhalb welcher Grenzen die Störspannungen und Spannungsgüten bei allen praktisch vorkommenden Belastungszuständen schwanken — die Grenzen sind vielleicht recht eng —, so wird die Starkstromindustrie bei der Lieferung der Wellensauger für die durch sie erzielten Senkungen der Störspannung Garantie leisten können; denn diese und nur diese Senkungen lassen sich genau vorausberechnen. — Es ist durchaus möglich, daß die zukünftige Entwicklung von den Größen Störstrom und Stromgüte keinen Gebrauch macht und sich ganz auf die Untersuchungen von

Störspannung und Spannungsgüte beschränkt. Die praktische Messung der Spannungsgrößen läßt sich, z. B. an einer Linie eines vermaschten Straßenbahnnetzes, die eine Näherung besitzt, viel einfacher durchführen als die von Stromuntersuchungen: es ist nur nötig, je einen Draht an die Oberleitung und an die Schienen zu führen und während einer gewissen Zeit die Schwankungen der Störspannung zu beobachten.

c) Vorausberechnung der Störungen.

Eine Vorausberechnung, die Anspruch auf Zuverlässigkeit erheben will, wird sich nicht eher durchführen lassen, als bis genügendes Zahlenmaterial über die Störspannungen, Unsymmetrien und Kompensationsfaktoren vorliegt. Weiterhin sind zu klären die Wirkung der zweiseitigen Speisung, die Stromverteilung der Wechselströme in vermaschten Netzen, die Schwankungen der Bodenleitfähigkeit (von Bedeutung bei den M-Werten), die Größe der Induktivität der Fahrmotoren bei betriebsmäßiger Gleichstrom-Vormagnetisierung. — Bei unverzweigten, einseitig gespeisten Strecken wird der Berechnung der Störungen in benachbarten Doppelleitungen die Gleichung (17)

$$\mathrm{Gspg_D} = \mathfrak{E}_{st} \cdot \left(\frac{u_e/4 \cdot m_E \cdot l + m_D \cdot l'}{L} \right) \cdot 10^{-3} \ \mathrm{mV}$$

zugrunde gelegt werden. In der folgenden Aufstellung ist die Bedeutung der einzelnen Größen zusammengestellt; die Unsicherheiten der Zahlenwerte sind in jedem Fall zum Ausdruck gebracht.

$\mathrm{Gspg_D}$ die Geräuschspannung in einer Doppelleitung; für den Wert wird eine bestimmte obere Grenze noch festzusetzen sein: 1, 2, 5, 10 mV?

$\mathfrak{E}_{st}$ die Störspannung des Gleichrichters oder des Netzes an der Näherungsstrecke, in V; $\mathfrak{E}_{st} = (0{,}02 \ldots 0{,}05) \cdot E_0$ (E_0 = Nennspannung)?

u_e die Unsymmetrie gegen Erde. Bei Kabeln mit symmetrischen Schaltungen ist sie Null. Bei Freileitungen mit symmetrischen Schaltungen ist nach den Richtlinien des CCI als vorläufiger Wert max. 0,04 zugelassen. Die Herabsetzung dieses Wertes wird, namentlich von seiten der Starkstromindustrie, angestrebt. Bei Freileitungen mit erdunsymmetrischen, unmittelbar angeschlossenen Schaltungen ist u_e die Unsymmetrie dieser Schaltungen (bisher nur ein Apparattyp untersucht). Bei Kabeln mit unsymmetrischen, ohne Übertrager angeschlossenen Schaltungen ist u_e die Unsymmetrie dieser Schaltungen

mal einem die Kompensationswirkung des Kabelmantelstroms berücksichtigenden Faktor, der von der Bauart des Kabels abhängt (0,05 ... 0,01 ?).

m_E die Gegeninduktivität von Einfach- auf Einfachleitung nach Abb. 6 (S. 13), in H/km. Einfluß der Bodenleitfähigkeit σ?

l die Länge der Näherung, in km.

m_D die Gegeninduktivität zwischen Einfach- und Doppelleitung nach Abb. 7 (S. 14), in H/km. Einfluß von σ?

l' die Länge der Näherung, jedoch höchstens die Störungslänge l_s, in km. In Deutschland $l_s = 40, 8$ und 1,6 km.

L die Selbstinduktivität der Starkstromanlage, in H. Zu berücksichtigen ist diejenige eines etwa vorhandenen Speisekabels oder einer Speiseleitung, diejenige der Fahrleitung bzw. der Stromschienen, der Motoren und der Fahrschienen. Induktivität der Motoren? (Größenordnung: höchstens einige mH.) Bei Speisekabeln kann die Induktivität etwa 0,5 mH/km betragen, bei Speiseleitungen und oberirdischen Leitungen einschließlich der kompensierenden Wirkung der Fahrschienen als Mittelwert etwa 2 mH/km, bei dritter Schiene etwa 1 mH/km; diese Zahlen sind nach den Ausführungen im zweiten Kapitel durchaus nur als Näherungswerte zu betrachten.

Ehe zuverlässige, in allen Fällen ausreichende Unterlagen für eine Vorausberechnung der Fernsprechstörwirkung von Gleichrichterbahnen vorhanden sein werden, wird noch viel Arbeit zu leisten sein.

Literatur.

Die mit einem * bezeichneten Aufsätze sind auch erschienen in dem Buch: Die Beeinflussung des Fernmeldebetriebs durch elektrische Bahnen. Herausgeber W. Wechmann, Charlottenburg (Rom-Verlag) 1927.

[1]) R. Rüdenberg, Schwachstromstörungen beim Schalten von Gleichstrombahnen. Wiss. Veröff. Siemens-Konzern Bd. V, 1927, Heft 3.

[2]) P. Jäger, Der Einfluß von Starkstromanlagen auf alle Arten von Fernmeldeleitungen. ETZ Bd. 47, 1926, Heft 21 S. 605 und Telegr.- u. Fernspr.-Techn. (TFT) Bd. 15, 1926, Heft 3 S. 65.

[3]) F. Breisig, Theoretische Telegraphie. 2. Aufl. Braunschweig (Vieweg) 1924. S. 175.

[4]) K. E. Müller, Der Quecksilberdampf-Gleichrichter. Bd. 1. Berlin (Springer) 1925.

[5]) Marti und Winograd, Mercury Arc Power Rectifiers. Journ. AIEE. Bd. 46, 1927, Heft 8 S. 818.

[6]) P. Jäger, Beeinflussung von Fernmeldeleitungen durch Hochspannungsanlagen. ETZ Bd. 45, 1924, Heft 18 S. 417.

[7]) Zastrow und Benda, Einwirkungen von Gleichrichteranlagen auf Fernsprechleitungen. ETZ Bd. 46, 1925, Heft 39 S. 1478.

[8]) E. W. Marchant, Method of Getting Rid of Telephone Interference from Mercury-Arc-Rectifier. Journ. IEE. Bd. 62, 1924, Nr. 334 S. 857. (Ref. ETZ Bd. 47, 1926, Heft 43 S. 1266.)

*[9]) M. Schenkel, Störungen des Fernsprechbetriebes durch Gleichrichter und ihre Beseitigung. El. Bahnen Bd. 2, 1926, Heft 7 S. 217.

[10]) Holling und Benda, Fernsprechleitungen im Gleichstrombetriebe der Berliner Stadt-, Ring- und Vorortbahnen. El. Bahnen Bd. 2, 1926, Heft 11 S. 396.

[11]) O. Brauns, Störungen an Schwachstromleitungen durch Wechselstrombahnen. Arch. Post u. Tel. 1914, Heft 2 S. 33.

[12]) F. Breisig, Über die Berechnung der magnetischen Induktion aus Wechselstromleitungen mit Erdrückleitung. TFT Bd. 14, 1925, Heft 4 S. 93.

[13]) R. Rüdenberg, Die Ausbreitung der Erdströme in der Umgebung von Wechselstromleitungen. Zeitschr. angew. Math. u. Mech. Bd. 5, 1925, S. 361.

[14]) F. Pollaczek, Über das Feld einer unendlich langen, wechselstromdurchflossenen Einzelleitung. El. Nachr. Techn. (ENT) Bd. 3, 1926, Heft 9 S. 339.

[15]) O. Mayr, Die Erde als Wechselstromleiter. ETZ Bd. 46, 1925, Heft 36/38 S. 1352/1426.
[16]) I. R. Carson, Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return. The Bell System Techn. Journ. Bd. 5, 1926, Heft 4 S. 539.
[17]) G. Haberland, Theorie der Leitung von Wechselstrom durch die Erde. Zeitschr. angew. Math. u. Mech. Bd. 6, 1926, Heft 5 S. 366.
[18]) Mitsuda und Kasai, The „K-M-Chart". Gen. El. Rev. Bd. 28, Heft 5 S. 290. (Ref. ETZ Bd. 48, 1927, Heft 3 S. 84.)
[19]) A. Lindström, Über die Größe der Gegeninduktivität zwischen Leitungen mit Erdrückleitung. El. Bahnen Bd. 3, 1927, Heft 4 S. 128.
[20]) W. Lühr, Untersuchungen über den Einfluß von Erdrückströmen auf lange Leitungen. ETZ Bd. 48, 1927, Heft 15 S. 510. (Sb Diss. TH. Darmstadt 1923.)
[21]) Comité Consultatif International des Communications Téléphoniques à grande distance, Directives concernant les mesures à prendre pour protéger les lignes téléphoniques contre les influences perturbatrices des installations d'énergie à courant fort ou à haute tension („Cahier bleu"). Paris 1926.
*[22]) A. Zastrow, Über die Größe der Gegeninduktivität zwischen Leitungen mit Erdrückleitung. El. Bahnen Bd. 2, 1926, Heft 10 S. 368.
[23]) Krause und Zastrow, Über die Schutzwirkung des Kabelmantels bei Induktionsbeeinflussungen von Schwachstromkabeladern durch Starkstromleitungen. Wiss. Veröff. Siemens-Konzern Bd. II, 1922, S. 422.
[24]) W. Riehl, Das Pupinkabel längs der elektrischen Eisenbahn Schopfheim—Säckingen. Siemens-Zeitschr. Bd. 7, 1927, Heft 6 S. 430.
[25]) DRP. Nr. 443 162 von S. & H., Verfahren zur Beseitigung induktiver Störungen in pupinisierten Kabelleitungen.
[26]) Leitsätze für Maßnahmen an Fernmelde- und an Drehstromanlagen im Hinblick auf gegenseitige Näherungen. ETZ Bd. 46, 1925, Heft 30 S. 1126 und TFT Bd. 14, 1925, Heft 11 S. 324.
*[27]) Leitsätze für Maßnahmen an Fernmeldeanlagen des öffentlichen Verkehrs und an Bahnanlagen mit einphasigem Wechselstrombetrieb im Hinblick auf gegenseitige Näherungen (Entwurf). El. Bahnen Bd. 2, 1926, Heft 12 S. 432.
[27a]) Bahnleitsätze, endgültige Fassung: TFT Bd. 16, 1927, Heft 8 S. 238.
*[28]) H. Klewe, Bestimmung der in Fernsprechleitungen durch Starkstromanlagen hervorgerufenen Störungen. ENT Bd. 3, 1926, Heft 6 S. 220 und El. Bahnen Bd. 2, 1926, Heft 10 S. 361.
[29]) Schaltbilder für Sprechstelleneinrichtungen der Reichs-Telegraphenverwaltung, ZB. Berlin (Reichsdruckerei) 1923.
[30]) Deutsche Reichspost, Geschäftsbericht über das Wirtschaftsjahr 1926, S. 55 u. 56. Berlin (Reichsdruckerei).
[31]) K. Küpfmüller, Vergleichende Geräuschmessung. Wiss. Veröff. Siemens-Konzern Bd. III, 1924, Heft 2.
[32]) DRP-Anmeldung Nr. S 71325 der SSW: Anordnung der Hin- und Rückleitung von Schwachstromfreileitungen.

[33]) W. Pinkert, Induktionsschutz für Fernsprechleitungen. TFT 1919, 4. Sonderheft S. 108.
[34]) E. Orlich, Aufnahme und Analyse von Wechselstromkurven. S. 75/76. Braunschweig (Vieweg) 1906.
[35]) W. Geyger, Messung der Wechselstromkomponente von Gleichrichterströmen nach der Kompensationsmethode. Arch.El. Bd. 18, 1927, Heft 6 S. 641.
*[36]) P. Jäger, Quantitative Messung der Fernsprechstörwirkung von Stromerzeugern und -verbrauchern als Oberschwingungsgeneratoren. ENT Bd. 3, 1926, Heft 6 S. 208 und El. Bahnen Bd. 2, 1926, Heft 9 S. 337.
[37]) H. S. Osborne. Review of Work of Sub-Committee on Wave-Shape Standard of Standards Committee, Transact. AIEE. Bd. 38, 1919, I. Teil S. 261.
[38]) Druckschrift Rel. ltg. 61a von S. & H.: Der Geräuschspannungsmesser.
[39]) L. Dreyfus, Der Telephonstörungsfaktor von Wechselstrombahnmotoren und seine experimentelle Bestimmung. Bull. Schweizer El.V. Bd. 16, 1925, Heft 8 S. 460.

Anlage 1.

Untersuchung des Frequenzeinflusses auf den Betrag des Scheinwiderstands von Resonanzquerkreisen.

Es soll sein:

1. bei der Kreisfrequenz ω:

$$\omega \cdot L = \frac{1}{\omega \cdot C} \text{ und der Gesamtverlustwiderstand} = r,$$

2. bei der Kreisfrequenz $\alpha \cdot \omega$:

$$Z = \sqrt{r^2 + \left(\alpha \cdot \omega \cdot L - \frac{1}{\alpha \cdot \omega \cdot C}\right)^2} = \beta \cdot r \qquad (\beta > 1).$$

Aus beiden Gleichungen folgt:

$$\beta^2 \cdot r^2 = r^2 + \left(\alpha \frac{1}{\omega \cdot C} - \frac{1}{\alpha \cdot \omega \cdot C}\right)^2$$

$$r\sqrt{\beta^2 - 1} = \frac{1}{\omega \cdot C}\left(\alpha - \frac{1}{\alpha}\right)$$

$$\omega \cdot L = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{r\sqrt{\beta^2 - 1}}{\alpha - \frac{1}{\alpha}} = r \cdot K.$$

Annahme: $\alpha = 1{,}01$, $\beta = 1{,}5$, d. h. bei $1\,\%$ Frequenzänderung soll der Scheinwiderstand des Resonanzkreises $50\,\%$ höher sein als der Verlustwiderstand bei Resonanz.

Hiermit wird:

$$K = \frac{\sqrt{1{,}5^2 - 1}}{1{,}01 - \frac{1}{1{,}01}} = \frac{1{,}12}{0{,}02} = 56.$$

Bei $f = 300$ Hz ($\omega = 1885$) und $r = 0{,}61$ Ohm (s. S. 9) müßte dann sein

$$\omega \cdot L = \frac{1}{\omega \cdot C} = 0{,}61 \cdot 56 = 34{,}2 \text{ Ohm},$$

$$L = 18{,}1 \text{ mH},$$

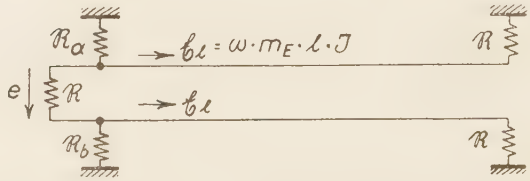
$$C = 15{,}5\ \mu\text{F}.$$

Bei den auf S. 9 angegebenen Daten für Induktivität und Kapazität ergibt sich, wie leicht nachzurechnen ist, bei $1\,\%$ Frequenzschwankung eine Widerstandszunahme von nur $4\,\%$.

Anlage 2.

Ableitung der Formel: $Gspg_1 = u_e/4 \cdot \omega \cdot m_E \cdot l \cdot \mathfrak{J}$.

Die gemachten Annahmen gehen aus dem folgenden Schema hervor:

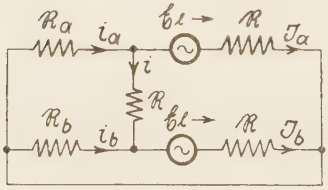


Gegeben ist: $\mathfrak{E}_l$, $\mathfrak{R}_a$, $\mathfrak{R}_b$, $\mathfrak{R}$; es sei $\mathfrak{R}_a \sim \mathfrak{R}_b \sim \mathfrak{R}$,

$$u_e = \frac{\mathfrak{R}_a - \mathfrak{R}_b}{\mathfrak{R}}.$$

Gesucht ist: e (Spannung am Hörer) $= i \cdot \mathfrak{R}$.

Mit Benutzung der im Ersatzstromkreis eingetragenen Ströme ergeben sich die folgenden fünf Gleichungen (3 Umlaufs- und 2 Knotenpunktgleichungen) für die fünf Unbekannten i_a, i_b, J_a, J_b, i:



1. $i_a \cdot \mathfrak{R}_a + \mathfrak{E}_l + J_a \cdot \mathfrak{R} = 0$
2. $i_b \cdot \mathfrak{R}_b + \mathfrak{E}_l + J_b \cdot \mathfrak{R} = 0$
3. $J_a - J_b = i$
4. $i_a = i + J_a$
5. $i_b = J_b - i$

Die — rein elementare — Auflösung dieser 5 Gleichungen nach i ist der Vollständigkeit wegen angegeben:

Durch Einsetzen von i_a und i_b in 1. und 2. ergibt sich

1′. $(i + J_a) \cdot \mathfrak{R}_a + \mathfrak{E}_l + J_a \cdot \mathfrak{R} = 0$

2′. $(J_b - i) \cdot \mathfrak{R}_b + \mathfrak{E}_l + J_b \cdot \mathfrak{R} = 0$

3. $J_b = J_a - i$

Einsetzen von J_b in 2′.:

2″. $(J_a - 2 \cdot i) \cdot \mathfrak{R}_b + \mathfrak{E}_l + (J_a - i) \cdot \mathfrak{R} = 0$.

J_a aus 1′.:

$$i \cdot \mathfrak{R}_a + J_a(\mathfrak{R}_a + \mathfrak{R}) + \mathfrak{E}_l = 0$$

$$J_a = \frac{-\mathfrak{E}_l - i \cdot \mathfrak{R}_a}{\mathfrak{R}_a + \mathfrak{R}}.$$

Einsetzen von J_a in 2'':

$$2'''.\ \left(\frac{-\mathfrak{E}_1 - i\cdot\Re_a}{\Re_a + \Re} - 2i\right)\Re_b + \mathfrak{E}_1 + \left(\frac{-\mathfrak{E}_1 - i\cdot\Re_a}{\Re_a + \Re} - i\right)\cdot\Re = 0 \quad \| \cdot(\Re_a + \Re)$$

$$[-\mathfrak{E}_1 - i\cdot\Re_a - 2i(\Re_a + \Re)]\cdot\Re_b + \mathfrak{E}_1(\Re_a + \Re) + [-\mathfrak{E}_1 - i\cdot\Re_a - i(\Re_a + \Re)]\cdot\Re = 0$$

$$-\mathfrak{E}_1\cdot\Re_b - i\cdot\Re_a\cdot\Re_b - 2i\cdot\Re_a\cdot\Re_b - 2i\cdot\Re\cdot\Re_b + \mathfrak{E}_1\cdot\Re_a + \mathfrak{E}_1\cdot\Re - \mathfrak{E}_1\cdot\Re - i\cdot\Re\cdot\Re_a - i\Re_a\cdot\Re - i\Re^2 = 0$$

$$\mathfrak{E}_1(\Re_a - \Re_b) - i\cdot(3\Re_a\cdot\Re_b + 2\cdot\Re\cdot\Re_a + 2\cdot\Re\cdot\Re_b + \Re^2) = 0$$

$$\mathfrak{E}_1\frac{\Re_a - \Re_b}{\Re} = i\cdot\left(3\cdot\frac{\Re_a\Re_b}{\Re} + 2\cdot\Re_a + 2\cdot\Re_b + \Re\right)$$

$$\mathfrak{E}_1\cdot u_e \sim i\cdot 8\cdot\Re = 8\cdot e$$

$$e = u_e/8\cdot\mathfrak{E}_1$$

Die Geräuschspannung $Gspg_1$ ist als EMK das Doppelte der Klemmenspannung e am Hörer (s. z. B. Küpfmüller[31]), also

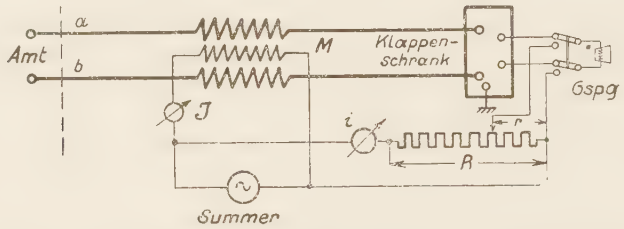
$$Gspg_1 = u_e/4\cdot\mathfrak{E}_1 = u_e/4\cdot\omega\cdot m_E\cdot l\cdot\Im.$$

Anlage 3.

Anordnung zur Gleichgewichtsmessung stark unsymmetrischer Schaltungen.

Die Anordnung beruht darauf, daß an der Stelle, an der im Betrieb die störende Längsspannung $\mathfrak{E}_1$ in dem zu untersuchenden System erzeugt wird, statt dieser Längsspannung dem System künstlich eine bekannte bzw. berechenbare Spannung $\mathfrak{E}$ aufgedrückt und die von dieser Spannung am Fernhörer hervorgerufene Geräuschspannung (Klemmenspannung) Gspg gemessen wird. Als Erdunsymmetrie ist dann das Verhältnis: $8 \cdot \text{Gspg}/\mathfrak{E}$ zu definieren.

Die Abbildung veranschaulicht die Schaltung; es ist angenommen, daß die Längsspannung in der Verbindungsleitung vom Amt zu einem Klappenschrank induziert wird.



Die in a und b liegenden Spulen werden gleichsinnig induziert und erzeugen eine Spannung $\mathfrak{E} = \mathfrak{J} \cdot \omega \cdot M$ im System (M die bekannte Gegeninduktivität zwischen der inneren und einer der äußeren Spulen). $\mathfrak{E}$ verursacht im Hörer in der Stellung „oben“ eine Geräuschspannung; die gleiche Geräuschspannung ist bei der Stellung „unten“ durch Regeln am Spannungsteiler einzustellen. Bei gleicher Lautstärke in beiden Stellungen ist:

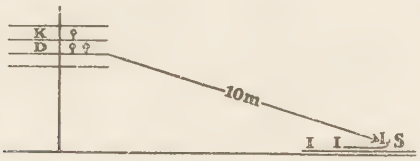
$$u_e = \frac{8 \cdot \text{Gspg}}{\mathfrak{J} \cdot \omega \cdot M} = \frac{8 \cdot \frac{r}{R} \cdot i \cdot R}{\mathfrak{J} \cdot \omega \cdot M} = \frac{8 \cdot i \cdot r}{\mathfrak{J} \cdot \omega \cdot M}.$$

Die Widerstände und Induktivitäten der beiden in die Leitungszweige geschalteten Spulen müssen so klein sein, daß sie keine wesentliche Veränderung in den Verhältnissen des Systems verursachen. — Steht ein frequenzvariabler Summer zur Verfügung, so läßt sich $u_e = F(f)$ ermitteln.

Anlage 4.

Rechnerische Untersuchung des Einflusses geerdeter Induktionsschutzdrähte.

Angenommen seien folgende geometrische Verhältnisse:



Es bezeichne: S die Stromschiene,
D die Doppelleitung,
K den Kompensationsdraht;
ferner: erster Index: den induzierenden Leiter,
zweiter Index: den induzierten Leiter,
der Zusatz s: Schleifenspannung,
der Zusatz l: Längsspannung.

Alle Rechnungen beziehen sich auf 1 km Länge.

Die Doppelleitung enthalte keine Kreuzungen; ihre Erdunsymmetrie betrage 4 %. Der beiderseits geordnete Kompensationsdraht sei eine Bronzeleitung mit 3 mm Durchmesser. Der beeinflussende Fahrstrom betrage (unter Berücksichtigung der Kompensationswirkung der Fahrschiene) $\mathfrak{J}_0 = 2$ A der Frequenz 300 Hz. Bei der Summierung der Geräuschspannungen ist als ungünstigster Fall angenommen, daß sie in Phase sind (vgl. S. 27).

Der Fahrstrom J_0 induziert in der Doppelleitung bei einer Doppelleitungs-Gegeninduktivität von

$$M_D \Big| \begin{matrix} 10\text{ m} \\ 300\text{ Hz} \end{matrix} = 5{,}3 \cdot 10^{-6}\ \text{H/km}$$

(25 cm Schleifenbreite) eine Schleifenspannung von

$$E_{SDs} = 2 \cdot 1885 \cdot 5{,}3 \cdot 10^{-6}$$
$$= 0{,}02\ \text{V} = 20\ \text{mV},$$

die in vollem Betrag als Geräuschspannung wirkt.

Außerdem induziert der Fahrstrom bei einem

$$M_E \Big| \begin{matrix} 10\ \text{m} \\ 300\ \text{Hz} \end{matrix} = 0{,}8 \cdot 10^{-3}\ \text{H/km}$$

in der Doppelleitung eine Längsspannung von

$$E_{SDl} = 2 \cdot 1885 \cdot 0{,}8 \cdot 10^{-3} = 3\ \text{V}.$$

Die gleiche Längsspannung wird auch im Kompensationsdraht induziert (E_{SKl}).

In der Doppelleitung wirkt von den 3 V Längsspannung bei der angenommenen Erdunsymmetrie von 4 % auf den Hörer eine Schleifenspannung von 1 % der Längsspannung, also von 0,03 V = 30 mV als Geräuschspannung.

Der Scheinwiderstand des Kompensationsdrahtes beträgt bei widerstandsloser Erdung

$$2{,}5 + \text{j}\,1885 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 2{,}5 + \text{j}\,3{,}8 = 4{,}5\ \Omega;$$

der kompensierende Strom ist also

$$\Im_K = \frac{3{,}0}{4{,}5} = 0{,}67\ \text{A}.$$

Bei einem $M_E \Big| \begin{matrix} 0{,}33\ \text{m} \\ 300\ \text{Hz} \end{matrix} = 1{,}5 \cdot 10^{-3}\ \text{H/km}$

wird die von $\Im_K$ induzierte Kompensationsspannung in der Doppelleitung (Längsspannung) $E_{KDl} = 0{,}67 \cdot 1885 \cdot 1{,}5 \cdot 10^{-3} = 1{,}885$ V. Diese Spannung bewirkt unter Berücksichtigung der Phasenlagen (s. Abb.) eine Senkung der Längsspannung in der Doppelleitung von 3 auf 1,76 V ($\mathfrak{E}_{Dl}$) und damit der von der Längsspannung herrührenden Geräuschspannung von 30 auf rd. 19 mV, d. h. auf fast die Hälfte des Wertes ohne Kompensationsdraht (die 20 mV Schleifengeräuschspannung werden durch den Kompensationsdraht nicht vermindert).

Außerdem induziert der Kompensationsstrom in der zu ihm stark unsymmetrisch liegenden Doppelleitungsschleife eine Schleifenspannung E_{KDs}, die bei den angenommenen geometrischen Verhältnissen etwa 5 % der Längsspannung E_{KDl} betragen wird: es ergibt sich also bei der ge-

wählten Anordnung ohne Kompensationsdraht eine Geräuschspannung von $20 + 30 = 50$ mV, mit Kompensationsdraht eine solche von $20 + 18 + (0{,}05 \cdot 1885) = 20 + 18 + 95 = 133$ mV.

Aus der folgenden Zusammenstellung gehen der Einfluß des Kompensationsdrahtes, seiner Lage zur Doppelleitung und des Kreuzens der letzteren hervor.

I. Ungekreuzte Doppelleitung.

a) Kein Kompensationsdraht:
$20 + 30 = 50$ mV Geräuschspannung.

b) Mit Kompensationsdraht:

α) mit 5% Unsymmetrie in bezug auf die Doppelleitung:
$20 + 18 + 95 = 133$ mV.

β) mit zur Doppelleitung symmetrisch angeordnetem Kompensationsdraht:
$20 + 18 = 38$ mV.

II. Doppelleitung gekreuzt.

a) Kein Kompensationsdraht:
Es verschwindet E_{SDs}, Geräuschspannung 30 mV.

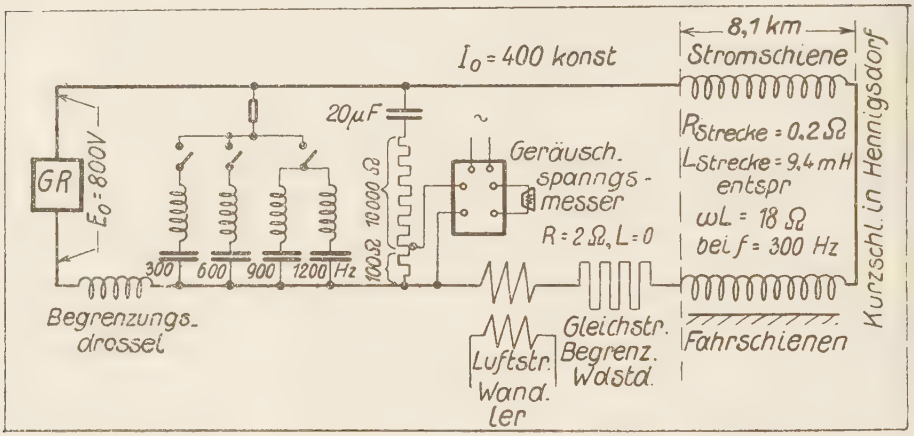
b) Mit Kompensationsdraht:
Es verschwindet außer E_{SDs} noch E_{KDs} auch bei unsymmetrischer Lage des Kompensationsdrahtes zur Doppelleitung. Geräuschspannung also 18 mV.

Ergebnis: Ein Kompensationsdraht hat nur dann eine spannungssenkende Wirkung auf eine oder mehrere Doppelleitungen, wenn die von ihm induzierten Schleifenspannungen durch geeignete geometrische Anordnungen oder durch Kreuzen der Doppelleitungen zu Null gemacht werden. Im zweiten Falle wird auch die von der Schiene induzierte Schleifenspannung zu Null werden, die durch einen Kompensationsdraht nicht gesenkt werden kann.

Anlage 5.

Ergebnisse von Messungen im Gleichrichterwerk Tegel der Deutschen Reichsbahngesellschaft*).

Versuchsanordnung.



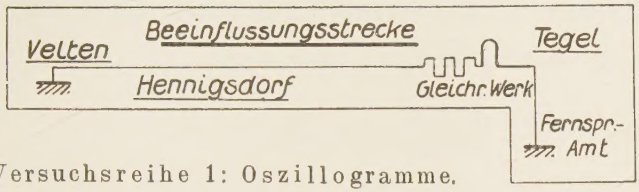
Der Gleichstrom-Begrenzungswiderstand von 2 Ohm ist eingebaut worden, um die Kabel usw. thermisch nicht zu überlasten. Gegenüber den 18 Ohm Blindwiderstand der Strecke bei der kleinsten in Frage kommenden Frequenz (f = 300 Hz) spielen die 2 Ohm Wirkwiderstand keine Rolle.

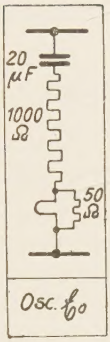
Betriebszustände.

Die Induktivität der Begrenzungsdrossel hat die Größenordnung von 1 mH; bei 9 mH Streckeninduktivität bewirkt ihre Einschaltung – im Gegensatz zu der Anlage der Abb. 19 S. 44 — keine wesentliche Senkung. Infolgedessen ist ein Betriebszustand „ohne Glättungseinrichtung" nicht untersucht worden.

a) Mit Begrenzungsdrossel,
b) mit Drossel + 300er Kreis,
c) mit Drossel + 300er + 600er Kreis,
d) mit Drossel + 300er + 600er + 900er + 1200er Kreis.

*) Die Mitteilung erfolgt im Einverständnis mit der RBD Berlin.



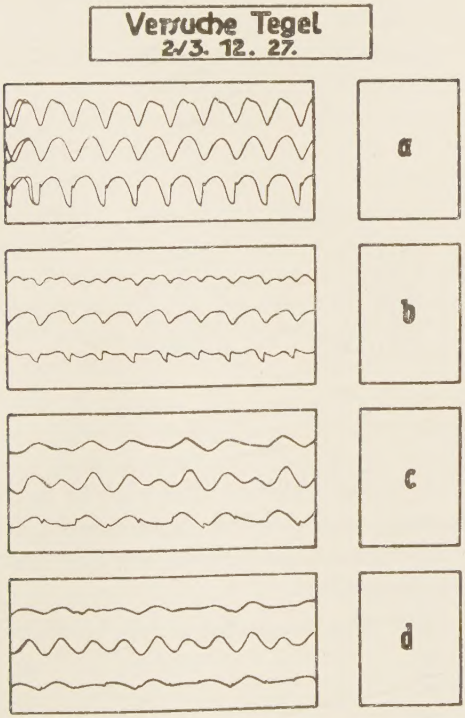


Versuchsreihe 1: Oszillogramme.

Obere Kurve: induzierte Spannung in einer beiderseits geerdeten Fernmeldeleitung (Freileitung).

Mittlere Kurve: Strom $\mathfrak{J}_0$ (vgl. S. 36).

Untere Kurve: Spannung $\mathfrak{E}_0$. ——————→



Versuchsreihe 2: Störstrom nach S & H (vgl. S. 39).

$M = 16\ \mu H$, Spannungsteiler am Geräuschspannungsmesser 1/10, hiermit

$$\mathfrak{J}_{st} = \frac{10 \cdot \text{Gspg in V}}{5000 \cdot 16 \cdot 10^{-6}} = 0{,}125 \cdot \text{Gspg in mV}.$$

a) gemessen 6 mV, $J_{st} = 0{,}8$ A
b) „ 4 „ „ $= 0{,}5$ „
c) „ 2,5 „ „ $= 0{,}31$ „
d) „ 1 „ „ $= 0{,}12$ „

Versuchsreihe 3: Stromanalyse (vgl. S. 37).

a) f =	300	$\mathfrak{J}_x = 2{,}62$ A	$\mathfrak{J}_x^2 = 6{,}87000$ A^2	$\mathfrak{J}_x^2 \left(\frac{c_x}{c_{800}}\right)^2$	$= 0{,}188$
	600	0,746	0,55800		0,140
	900	0,232	0,05380		0,121
	1200	0,091	0,00827		0,072
	1500	0,062	0,00384		0,004
				$\mathfrak{J}_{st} = \sqrt{0{,}525}$	
				$= 0{,}725$ A	

d) f =	300	$\mathfrak{J}_x = 0{,}920$ A	$\mathfrak{J}_x^2 = 0{,}84600$ A^2	$\mathfrak{J}_x^2 \left(\frac{c_x}{c_{800}}\right)^2$	$= 0{,}0169$
	600	0,070	0,00490		0,0012
	900	0,028	0,00078		0,0018
	1200	0,017	0,00029		0,0025
	1500	0,041	0,00017		0,0017
				$\mathfrak{J}_{st} = \sqrt{0{,}0241}$	
				$= 0{,}155$ A	

Versuchsreihe 4: Störspannung „nach S & H“ (vgl. S. 47).

Spannungsteilung durch das Potentiometer 1/100, durch den Spannungsteiler am Geräuschspannungsmesser 1/10, zusammen 1/1000, also $\mathfrak{E}_{st}$ in V = Gspg in mV.

a) $\mathfrak{E}_{st} = 22$ V, Spannungsgüte $= 2{,}75\,\%$ ($E_0 = 800$ V).
b) „ $= 12$ „ „ $= 1{,}5\,\%$ „
c) „ $= 10$ „ „ $= 1{,}25\,\%$ „
d) „ $= 4$ „ „ $= 0{,}5\,\%$ „

Lebenslauf.

Ich bin geboren am 28. Januar 1899 zu Breslau als der Sohn des Univ.-Prof. Dr. med. F. Roehmann, evangelischen Bekenntnisses, preußischer Staatsangehörigkeit. Von Ostern 1905 ab besuchte ich das städtische Johannes-Gymnasium zu Breslau, das ich Ostern 1917 mit dem Reifezeugnis verließ. Nach zweimonatiger praktischer Arbeit in den damals Kgl. Preuß. Eisenbahn-Hauptwerkstätten zu Breslau kam ich zum Militär und stand bis zum Ende des Kriegs bei verschiedenen Divisions-Funker-Abteilungen im Westen. Im Dezember 1918 begann ich mit dem Studium auf der Technischen Hochschule in Breslau und nebenher auf der dortigen Universität (Physik bei Geheimrat O. Lummer). Die Hochschule verließ ich im Herbst 1922 mit dem Diplom-Examen in der Fachrichtung für Elektrotechnik (Prof. Dr. Gg. Hilpert) und trat als Laboratoriumsingenieur in die Meßinstrumentenabteilung des Wernerwerks der Siemens & Halske AG. in Berlin-Siemensstadt ein (Direktor Prof. Dr. G. Keinath, Laboratoriumsvorstand Dr. H. Kafka). Nach $2^1/_2$jähriger Tätigkeit schied ich bei dieser Firma aus und erhielt eine Stelle als wissenschaftlicher Hilfsarbeiter beim Telegraphentechnischen Reichsamt, Berlin, im Referat für Starkstrombeeinflussung, die ich zur Zeit innehabe (Referent bis 31. September 1927 Oberpostrat Dr. P. Jäger, zur Zeit Reichspostministerium, seither Postdirektor Dr. H. Klewe).

Den Herren Prof. Hilpert, Dr. Kafka, Dr. Jäger und Dr. Klewe bin ich für die vielerlei Belehrung und wertvolle Anregung, die sie mir teils im allgemeinen, teils im besonderen im Hinblick auf die vorliegende Arbeit haben zuteil werden lassen, zu größtem Dank verpflichtet. Ich möchte nicht verfehlen, ihn auch an dieser Stelle zum Ausdruck zu bringen.

Ludwig F. Roehmann.